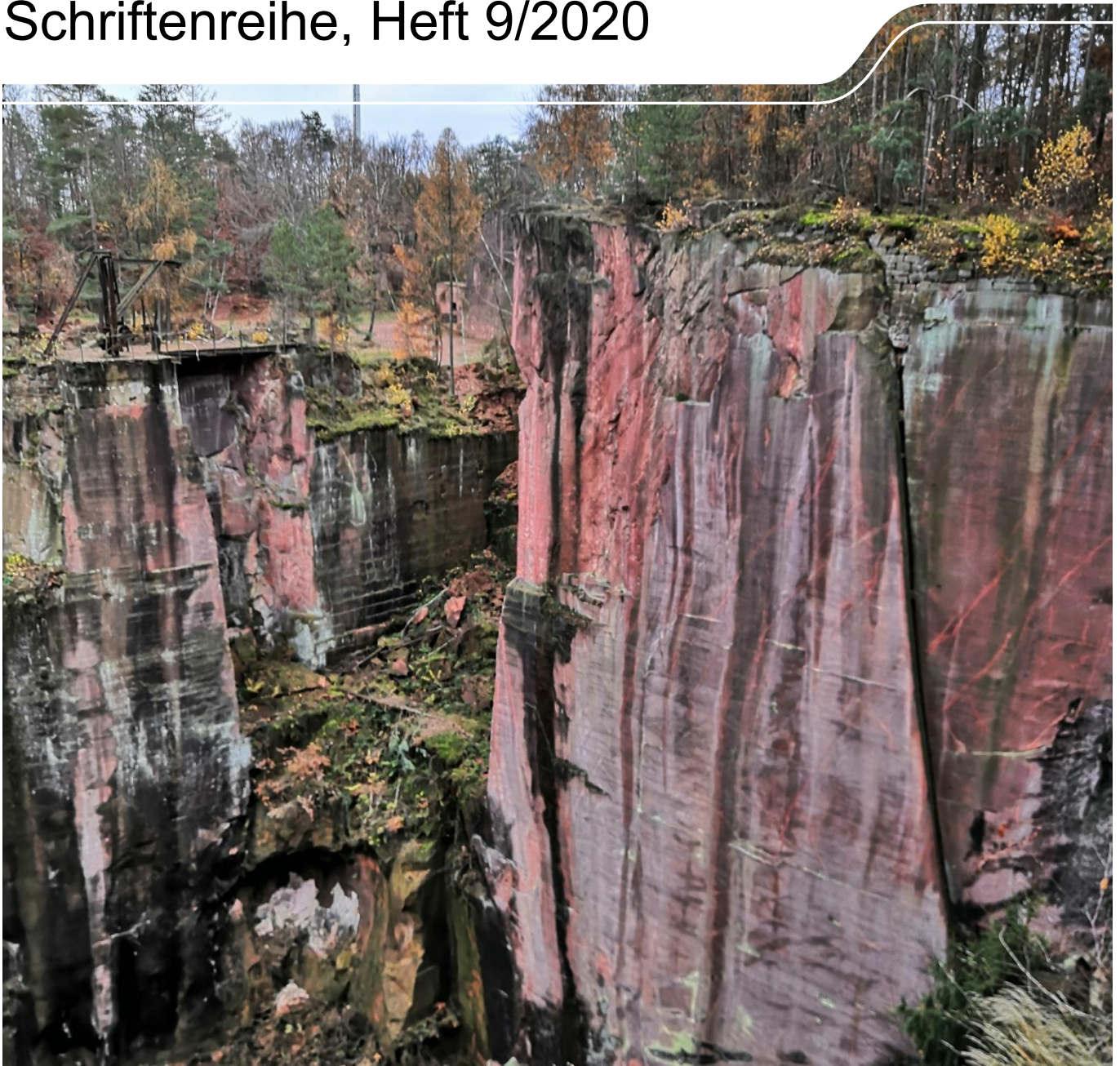




Der Rochlitzer Supervulkan

Schriftenreihe, Heft 9/2020



Der Rochlitzer Supervulkan:
Vulkanosedimentäre Faziesanalyse
und Geochemie des permischen
Rochlitz-Ignimbrit-Komplexes und
seiner distalen Äquivalente

Marcel Hübner, Alexander Repstock, Axel Rommel, Frank Fischer,
Manuel Lapp, Christoph Breitzkreuz, Franziska Heuer

Inhalt

Zusammenfassung	8
1 Einleitung	9
2 Regionalgeologischer Rahmen	13
3 Methodik	16
3.1 Probenahme und Präparation	16
3.2 Analytische Verfahren	17
3.2.1 Mikroskopische Bildanalyse	17
3.2.2 Gesamtgesteinsgeochemie	17
3.2.3 Rasterelektronenmikroskop und Elektronenstrahlmikrosonde	18
3.2.4 Laser-Ablation ICP-MS.....	19
4 Auswertung	20
4.1 Aufschlusssituation und Beschreibung	20
4.2 Lithologie und Petrographie	26
4.2.1 Nordsachsen: Pyroklastische Ablagerungen	26
4.2.1.1 Rochlitz Ignimbrite	26
4.2.1.2 Vitrophyr von Korpitzsch	29
4.2.2 Nordsachsen: Subvulkanite und Laven.....	30
4.2.2.1 Grimmaer und Gattersburger Porphyry.....	30
4.2.2.2 Leisniger Porphyry	31
4.2.3 Chemnitz Becken: Planitz-Ignimbrit	31
4.3 Geochemische Zusammensetzung.....	33
4.3.1 Klassifikation der Vulkanite	33
4.3.2 Alteration	37
4.4 Mineralchemie	38
4.5 Kristallisationsbedingungen.....	41
4.6 Altersdatierung	44
5 Erkenntnisse	45
5.1 Entwicklung des Nordsächsischen Vulkanit-Komplexes - Chronologie der Supereruptionen.....	45
5.2 Diskussion über das Magmensystem.....	46
5.3 Magnituden.....	47
Literaturverzeichnis	49
Anhang	57

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	logarithmische Skala des Vulkanexplosivitätsindex (VEI; nach NEWHALL & SELF 1982).	10
Abbildung 2:	Größenvergleich pyroklastischer Ablagerungen des Permokarbons in Sachsen auf Basis ihrer flächigen Verbreitung. Vereinfachte Altersdatierungen für die pyroklastischen Ablagerungen entnommen aus: TICHOMIROVA (1997), HOFFMANN et al. (2013), LUTHARDT et al. (2018), LÖCSE et al. (2019) und CASAS-GARCÍA et al. (2019b).	11
Abbildung 3:	Thermalquelle („Hot Spring“) bei Beppu auf der Insel Kyūshū in Japan (Foto: THIRAWARIN BUNYAPIPAT, Bangkok).	11
Abbildung 4:	Rochlitzer Porphyrtuff als Baustoff (Steinbruch am Rochlitzer Berg südwestlich von Rochlitz).	12
Abbildung 5:	Abbau des Rochlitzer Porphyrtuffs im aktiven Steinbruch am Rochlitzer Berg. Ausschnitt rechts unten zeigt einen Anschliff des Rochlitzer Porphyrtuffs mit deutlich sichtbaren Fiamme, Rauchquarz (Qz) und rötlichen Feldspat (Fsp).	21
Abbildung 6:	a) Rochlitzer Porphyrtuff am Sockel des Grunewaldturms in Berlin (Bezirk Charlottenburg-Wilmersdorf) lässt deutlich rotbraune und violette Fiamme erkennen; b) Rochlitz-Ignimbrit mit herausgewitterten Fiamme (Aufschluss östlich Geithain an der Bundesstraße 7).	21
Abbildung 7:	Der Rochlitzer Porphyrtuff, wie er etwa am Gleisbergbruch ansteht, findet sich an vielen Bauwerken, Denkmälern und Kunstwerken wieder. So im Grabmal des deutschen Philosophen Immanuel Kant (1724–1804) im heutigen Kaliningrad, dem Friedrich-August-Turm am Rochlitzer Berg, den Untergrundmessehallen in Leipzig mit Schmuckdetails von Otto Droge (Foto: PETER ROLLE, Leipzig), dem Denkmal „Block der Frauen“ in Berlin-Mitte zum Gedenken an den Rosenstraßen-Protest von 1943 (Foto: TUNCHIRA REPSTOCK, Berlin), der Sockel des Grunewaldturms in Berlin erbaut 1897 bis 1899 vom Architekten Franz Schwechten und die Gartenfiguren am Rochlitzer Berg.	22
Abbildung 8:	a) Aufschluss am Bahndamm, westlicher Ortsausgang von Kössern (Grimma, Landkreis Leipzig), zeigt im frischen Anschlag eine grünliche Verfärbung der Grundmasse (Rochlitz-β-Ignimbrit); b) Gesteinsanschliff zeigt deutlich die grünliche Grundmasse und gelblich verwitterte Feldspatkristalle; c) Steinklippen am Muldenufer zwischen Kössern und Höfgen (Grimma, Landkreis Leipzig) mit der dunkelgrauen Varietät des Rochlitz- β-Ignimbrits; d) Gesteinsanschliff des Rochlitz-N-Ignimbrits aus dem Steinbruch Wildschütz (Gemeinde Mockrehna, Landkreis Nordsachsen).	24
Abbildung 9:	Aufschluss des Grimmaer Porphyrs in der Nähe von Bahren entlang der Staatstraße 11. ...	26
Abbildung 10:	Mikroskopische Aufnahme des Rochlitz-β Ignimbrits unter gekreuzten Polarisatoren (Bohrung Ballendorf, Ba1/66 in 184,2 m Teufe).	28
Abbildung 11:	a) Durchschnittliche Korngrößenverteilung der Kristalle in verschiedenen pyroklastischen Ablagerungen des Nordsächsischen Vulkanitkomplexes (Rochlitz-, Wurzen-, Korpitzsch-Ignimbrit und Porphyrtuff vom Rochlitzer Berg) und des Chemnitz Beckens (Planitz-Ignimbrit), b) Gegenüberstellung des Sortierungsgrades und den Anteil des Korndurchmessers der Kristallfragmente über 2 mm. Daten für Snake-river-Typ Ignimbrite aus ELLIS et al. (2013).	28
Abbildung 12:	TAS („Total Alkali versus Silica“) - Diagramme zur Klassifikation von a) Vulkaniten (nach LE BAS et al. 1986) und b) Subvulkaniten (Ganggesteine, nach COX et al. 1979) im Nordsächsischen Vulkanitkomplex. Daten für den Wurzen-Ignimbrit und den Wurzener Porphyrtuff entnommen aus REPSTOCK et al. (2018) und für den Panitz Ignimbrit entnommen aus REPSTOCK et al. (2019a).	34
Abbildung 13:	Klassifikationsdiagramm nach PEARCE (1996) in denen Verhältnisse der immobilen Spurenelemente (Zr/Ti und Nb/Y) gegeneinander aufgetragen sind. Die Daten für den	

	Wurzen-Ignimbrit und dessen subvulkanischen Porphyry sind aus REPSTOCK et al. (2018) entnommen, für den Planitz-Ignimbrit aus REPSTOCK et al. (2019a).	35
Abbildung 14:	Spurenelementvariationsdiagramm der Rochlitz- und Wurzen-Ignimbrite im Nordsächsischen Vulkanitkomplex normalisiert auf den primitiven Mantel (nach Sun & McDonough 1985). Die mittlere Zusammensetzung der unteren und oberen Erdkruste (aus TAYLOR & MCLENNAN 1985) wurde zum Vergleich ebenfalls auf den primitiven Mantel normalisiert.	36
Abbildung 15:	Alterationsdiagramm in dem der Chlorit-Carbonat-Pyrit-Index (CCPI) nach LARGE et al. (2001) gegen den Alterationsindex (AI) nach ISHIKAWA et al. (1976) gegeneinander aufgetragen sind (modifiziert nach LARGE et al. 2001). Deutlich erkennbar ist die K-betonte Metasomatose bzw. Alteration der Gesteine im Rochlitzer Vulkansystem.	38
Abbildung 16:	Klassifikationsdiagramm im ternären Orthoklas (Or)– Albit (Ab)– Anorthit (An)-System zur Feldspatbestimmung. Im Rochlitzer Vulkansystem ist Alkalifeldspat Kalium-betont (Sanidin + Orthoklas), nur im Rochlitz-N-Ignimbrit konnte Natrium-betonter Alkalifeldspat (Anorthoklas) dokumentiert werden. Die Plagioklas-Mischkristallreihe tritt stets Na-betont auf (Albit, Oligoklas, Andesin). Jedoch liegt Plagioklas größtenteils alteriert vor (siehe Kapitel 4.2.2), sodass ursprünglich vorhandene Ca-reiche (oder auch An-reiche) Plagioklase nicht ausgeschlossen werden können.	39
Abbildung 17:	Schematischer Bauplan des Kristallgitters der Biotitgruppe.	40
Abbildung 18:	a) Klassifikationsdiagramm für Biotit zeigt deutlich zwei verschiedene Substitutionsmechanismen. Während im Biotit des Rochlitz- α - und des Rochlitz- β -Ignimbrite Substitutionen zwischen Fe und Mg entlang der Oktaederposition dominieren, substituiert im Biotit des Rochlitz-N- und Planitz-Ignimbrit Si und Al ^{IV} ; b) ternäres Diagramm zur Bestimmung von „frischem“, unverwittertem Biotit (nach NACHIT et al. 2005). Daten für den Planitz-Ignimbrit entnommen aus REPSTOCK et al. (2019a).	41
Abbildung 19:	Berechneter Kristallisationstemperatur (nach Henry et al. 2005) und –druck (nach Wu & Chen 2015) für Biotit im Rochlitzer Vulkansystem. Daten von Biotit des Planitz-Ignimbrits aus Repstock et al. (2019a).	43
Abbildung 20:	Schematische Darstellung des Rochlitzer Magmensystems mit berechneten geothermischen Gradienten.	47
Abbildung 21:	Schematischer Größenvergleich der Calderen des permischen Nordsächsischen Vulkanitkomplexes mit jenen der großen Supereruptionen des Känozoikums. Die Calderensysteme Nordsachsen sind farbig hervorgehoben.	48

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Liste der Probenahme für die Schwermineralanalyse (Koordinaten in UTM-Koordinaten). Abkürzungen: R _I – Rochlitz I, R _{II} – Rochlitz II, R _{III} – Rochlitz III, R _N – Rochlitz Nord, KP – Kemmlitzer Porphyry.....	17
Tabelle 2:	Parameter der quantitativen Bestimmung mittels Elektronenstrahlmikrosonde.	19
Tabelle 3:	Repräsentative Modalanalysen des Rochlitz-Ignimbrits in Vol.-%. Pseudomorphosen sind hier vernachlässigt. Die älteren Nomenklaturen sind folgenden Literaturen entnommen: EIGENFELD (1978) für den Nordsächsischen Vulkanitkomplex und FISCHER (1991) für das Chemnitz Becken. Modalanalysen des Planitz-Ignimbrits sind REPSTOCK et al. (2019a) entnommen.	29
Tabelle 4:	Repräsentative Modalanalysen im Grimmaer und Gattersburger Porphyry. Mineralpseudomorphosen sind nicht berücksichtigt. Angaben in Vol.-%	30
Tabelle 5:	Repräsentative Modalanalysen des Leisniger Porphyry (aus REHDA 2018). Xenolithvorkommen sind nicht berücksichtigt (Angaben in Vol.-%).	32
Tabelle 6:	Repräsentative geochemische Analysen, die zur Berechnung der Zirkonium- Sättigungstemperatur in den Gestein herangezogen wurde. Gesamtgesteinsanalysen des Planitz-Ignimbrits aus REPSTOCK et al. (2019a), des Wurzen-Ignimbrits aus REPSTOCK et al. (2018). Die errechneten Temperaturen (nach WATSON & HARRISON 1983) gelten nur für die aufgelisteten Analysen.	42
Tabelle 7:	²³⁸ U/ ²⁰⁶ Pb-Zirkon-Altersdatierungen an den permischen Vulkaniten Nordsachsens und des Planitz-Ignimbrits.....	45

Abkürzungsverzeichnis

Cps	dt: Zählimpulse pro Sekunde
Fm	Formation
K _v	Korpitzsch Vitrophyr
LA ICP-MS	Laser Ablation Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry
MLA	Mineral Liberation Analysis
MPS	maximum particle size
NSVK	Nordsächsischer Vulkanitkomplex
R _I	Döbeln-Rochlitz-Einheit (nach Eigenfeld 1977) oder die Döbeln-Einheit (nach Eigenfeld 1978)
R _{II}	Geithain-Einheit, Unterteilung der Rochlitz Ignimbrite nach EIGENFELD (1978)
R _{III}	Großbothen-Einheit, Unterteilung der Rochlitz Ignimbrite nach EIGENFELD (1978)
R _N	Lampersdorf Einheit, Unterteilung der Rochlitz Ignimbrite nach EIGENFELD (1978)
Rochlitz- α	R _I und R _{II} nach EIGENFELD (1978), Aktuelle Einteilung der Rochlitz-Ignimbrite
Rochlitz- β	R _{III} nach EIGENFELD (1978), Aktuelle Einteilung der Rochlitz-Ignimbrite
Rochlitz-N	Rochlitz-Nord (Wildschütz-Ignimbrit), Aktuelle Einteilung der Rochlitz-Ignimbrite
SHRIMP	Sensitive High Resolution Ion Microprobe
TAS	Total Alkali vs. Silica
VEI	Vulkanexplosivitätsindex

Zusammenfassung

Im Schatten der ausklingenden variszischen Gebirgsbildung erschütterten katastrophale Supervulkanausbrüche vor ca. 300 Millionen Jahren das Spätpaläozoikum Mitteleuropas. Östlich von Leipzig erstreckt sich auf einer Gesamtfläche von 2.000 km² (ca. 10 % der Fläche des Freistaates) der Nordsächsische Vulkanitkomplex, welcher mindestens zwei große Calderen beinhaltet: 1) das Wurzener und 2) das Rochlitzer Vulkansystem. Wobei die Gesteine des Rochlitzer Vulkansystems die größte Verbreitung finden. Ablagerungen dieser intrakontinentalen und großvolumigen Eruptionen dienten zahlreichen historischen Bauwerken als Baustoff (z. B. Völkerschlachtdenkmal in Leipzig, Grunewaldturm in Berlin, Grabmal von Immanuel Kant im heutigen Kaliningrad).

Verschiedene vulkanologische Detailaufnahmen und komplexe geochemische Untersuchungen vom Gesamtgestein bis zum Mineralkorn lassen die vulkanischen Ablagerungsprozesse, aber auch das Magmensystem rekonstruieren. Anhand von Sauerstoffisotopenverhältnissen und Altersdatierungen am Mineral Zirkon können mehrphasige Ausbrüche differenziert werden, welche Aufschluss über die stratigraphische Stellung der einzelnen Vulkanite im Rochlitz-Vulkansystem und der überlagernden Oschatz-Formation geben. Das Projekt unterstützt somit das Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG) in seiner Verwaltungsaufgabe der Geologischen Landesaufnahme. Darüber hinaus sind die gewonnenen Ergebnisse und Erkenntnisse eine Bereicherung für Geotourismus und Umweltbildung, welche durch den ortsansässigen „Geopark Porphyryland. Steinreich in Sachsen e.V.“ weitervermittelt werden.

Durch die Auswertung von über 49 Bohrkernen und 122 Schichtverzeichnissen aus den Archiven des LfULG am Standort Freiberg wurde die Mächtigkeit des Rochlitz-Ignimbrits auf über 400 m bestimmt. Diese Mächtigkeit und die Verteilung des Gesteins über eine Gesamtfläche von 1080 km² lassen ein Mindestvolumen von 432 km³ errechnen, was einem Vulkanexplosivitätsindex (VEI 7) entsprechen würde. Jedoch ist die Calderengröße (54 x 20 km) vergleichbar mit anderen großen Calderenkomplexen, welche durch VEI 8 Supereruptionen gebildet wurden. Das Gestein zeichnet sich durch einen hohen, monotonen Kristallgehalt von 35 bis 47 Vol.-% aus und lässt bei optischer Betrachtung keinerlei Unterscheidungsmerkmale auf verschiedene Ablagerungen erkennen. Lediglich die Kombination aus mehreren chemischen Untersuchungsmethoden erlaubt die Unterteilung in zwei pyroklastische Einheiten: 1) den hoch differenzierten rhyolithischen Rochlitz- α - und 2) den intermediären trachydazitischen Rochlitz- β -Ignimbrit. Somit sind diese Pyroklastite als *monotonous rhyolite* und *monotonous intermediate* zu klassifizieren. Die im Rahmen der Untersuchungen bestätigte Streuung der absoluten Altersdatierung an dem Mineral Zirkon lässt beide Rochlitz-Ignimbrite zeitlich nicht auseinanderhalten, was womöglich in Verbindung mit einer langanhaltenden Eruptionsphase oder mit einer extrem langlebigen Magmenkammer in Zusammenhang gebracht werden kann. Eine langlebige Magmenkammer entsteht, wenn basaltische Magmen aus dem oberen Erdmantel wiederholt aufsteigen und die Magmenkammer – wie die Herdplatte den Schmelzkäse im Kochtopf – immer wieder anheizen. Die Langlebigkeit solcher Magmensysteme erklärt aber auch das hohe Niobium-Tantal-Verhältnis (11,8 bis 17,9), welches auf einen starken krustalen Einfluss des Magmas schließen lässt. Je länger die Verweildauer einer Magmenkammer in der Erdkruste, desto größer ist die Möglichkeit chemische Elemente aufzunehmen. Der Titan-Gehalt der Rochlitz-Biotite lässt die Annahme einer Kristallisationstemperatur von 755°C und ein Druck von 4 kbar zu, was einer Tiefe von 15 km für die Rochlitzer Magmenkammer entspricht.

Die Längsachsenorientierung der Fiamme (durch Verschweißungskompaktion zusammengedrückte Bimse) weist daraufhin, dass das pyroklastische Material aus Spalten während der Hauptphase fontänenartig eruptierte (*pyroclastic fountaining*). Nach der Haupteruptionsphase kam es zu mehreren kleinräumigen Eruptionen und Intrusionen von Subvulkaniten, welche als Oschatz-Formation zusammengefasst werden, jedoch in engem Zusammenhang mit dem Rochlitz-Ignimbrit stehen. So führte die Intrusion des Leisniger Porphyrs, welcher infolge genauerer Untersuchungen als Lakkolith identifiziert werden konnte, zur Hebung (*Resurgence*) der Caldera. In den tieferen topographischen Lagen kam es in Folge der vulkanischen Ruhephasen zur Ablagerung von Seesedimenten.

Im südlich gelegenen Chemnitz Becken wurde ebenfalls eine vulkanische Ablagerung dokumentiert, die zeitlich und petrographisch dem Rochlitz-Ignimbrit zu entsprechen scheint. Dieses bisher als *Rochlitz Ignimbrit im Chemnitz Becken* beschriebene Gestein unterscheidet sich hinsichtlich der chemischen Signaturen im Gesamtgestein, aber auch hinsichtlich gekoppelter Substitutionen zwischen Aluminium und Eisen im Mineral Biotit. Damit scheint dieser Ignimbrit eine eigenständige Eruption zu repräsentieren, welcher nach seiner Typuslokalität in Zwickau den Namen *Planitz-Ignimbrit* erhalten hat. Sein Auftreten erinnert an die *Snake River-Typ-Ignimbrite* der westlichen USA.

Das Rochlitz-Vulkansystem zählt somit zu einem der vielfältigsten Supervulkane der Erdgeschichte, welches verschiedene Typen pyroklastischer Ablagerungen hervorgebracht hat. Gemeinsam mit dem Wurzener Vulkansystem sind diese Gesteine, welche während gigantischer Caldereneruptionen entstanden sind, einzigartige Fenster in die magmatischen und tektonischen Prozesse des Spätpaläozoikum in Mitteleuropa.

1 Einleitung

Volumenreiche Ejektionen pyroklastischen Materials in großen Calderensystemen zählen, neben Flutlava-Eruptionen zu den katastrophalen Ereignissen auf unserem Planeten, welche Auswirkungen im globalen Maßstab nach sich ziehen (SELF 2006; RAMPINO 2008; MILLER & WARK 2008; GROCKE et al. 2017). Viele Supervulkane, besonders entlang des Pazifischen Feuerrings, bedrohen bis zum heutigen Tag die menschliche Zivilisation. Einer der wohl bekanntesten schlummernden Supervulkane ist der Yellowstone in Wyoming (westliche USA, MILLER & WARK 2008; WOTZLAW et al., 2014), dessen letzter Ausbruch vor 630.000 Jahren Aschewolken als Feuerregen über einen Großteil der USA niederregnen lies (z. B. CHRISTIANSEN 2001). Die Stärke einer Eruption wird in einer Magnitudenskala wiedergeben, dem sogenannten Vulkanexplosivitätsindex (VEI, Abbildung 1, NEWHALL & SELF 1982). Dieser basiert auf dem Volumen des ausgeworfenen pyroklastischen Materials. Supereruptionen definieren sich durch einen Mindestauswurf von 1.000 km³, was einem VEI von 8 entspricht (Abbildung 1). Dass bereits kleinere Eruptionen das globale Geschehen beeinflussen, zeigen Eruptionereignisse der jüngeren Geschichte. So führte der Ausbruch des Eyjafjallajökull (VEI 4) auf Island im Jahr 2010 zu einem Aufstieg von Aschen in die oberen Bereiche der Atmosphäre und somit zu erheblichen Beeinträchtigungen im Flugverkehr. Feinste Aschepartikel wirken als Aerosol und beeinflussen den Strahlungshaushalt der Erde gravierend, in dem sie das eintreffende Sonnenlicht nicht passieren lassen. Durch den Ausbruch des Tambora im Jahr 1815 (VEI 7) kam es im darauffolgenden Jahr in Europa und den USA zu Ernteauffällen und daraus resultierenden Hungersnöten und Wirtschaftskrisen. Obwohl diese Ausbrüche gewaltig waren, reichen sie nicht an die Ausmaße der Supereruptionen heran.

Um Eruptionszyklen und den Einfluss auf das globale Klima vorauszusagen, rückte die Erforschung solcher Supervulkansysteme in den letzten drei Jahrzehnten immer mehr in den Fokus der Geologen und Geophysiker. Dabei werden auch pyroklastische Ablagerungen längst vergangener Eruptionen im Detail untersucht. Eine der wichtigsten Untersuchungsgebiete sind die spätpaläozoischen Vulkangebiete Nord- und Mitteleuropas. Sie reichen von den Vogesen im Westen (ARIKAS 1986) bis nach Kleinpoleen im Osten (SŁABY et al. 2010), sowie vom Bozener Prophyr in Südtirol (WILLCOCK et al. 2013) bis zum Oslograben (OFTEDAHL 1978). Da diese älteren Supervulkane im Laufe der Jahrmillionen teilweise erodiert wurden, ermöglichen diese gut erhaltenen Relikte tiefe Einblicke in den Aufbau solcher Calderensysteme. Allein der Freistaat Sachsen beherbergt vier große Vulkanzentren: 1) *Altenberg-Teplice Vulkanitkomplex*, 2) *Tharandter Wald Caldera*, 3) *Meißner Vulkanitkomplex* und 4) *Nordsächsischer Vulkanitkomplex* (Abbildung 2). Diese ähneln in Häufigkeit und Erscheinungsbild jenen der großen känozoischen Supervulkansysteme im westlichen Nordamerika (BREITER et al. 2001; BREITKREUZ 2015; HÜBNER et al., 2016; REPSTOCK et al. 2016; 2018, CASAS-GARCÍA et al. 2019a). Der Nordsächsische Vulkanitkomplex (NSVK) ist mit einer Gesamtfläche von über 2.000 km² das größte aufgeschlossene Calderensystem Mitteleuropas aus dieser Epoche (REPSTOCK et al. 2018). Der NSVK besteht aus zwei mächtigen Ignimbritabfolgen, Rochlitz- und

Wurzen-Ignimbrit, welche aus Glutwolkendecken gigantischer Eruptionereignisse hervorgegangen sind (RÖLLIG 1969; EIGENFELD 1978). Vermutlich war die permokarbone Landschaft Nordsachsens in den Ruhephasen durch Thermalquellen und kleineren aktiven Vulkankratern charakterisiert, ähnlich wie es heute um einen der aktivsten Supervulkane der Erde, den schlummernden Aso-san auf Kyūshū (Japan), aussieht (Abbildung 3).

Neben den großen Glutwolkenablagerungen treten in Nordsachsen aber auch sedimentäre Abfolgen aus Konglomerat, Sand- und Siltsteinen auf, welche überwiegend als alluviale Schuttfächer des Variszischen Gebirges und erodierender Vulkanbauten interpretiert werden (WALTER 2006). Teilweise sind Seeablagerungen dokumentiert worden, die sich in den topographischen Tieflagen des Vulkankomplexes bildeten (*Versteinerter See* nordöstlich von Börtewitz, WALTER 2010, GOLD 2011).

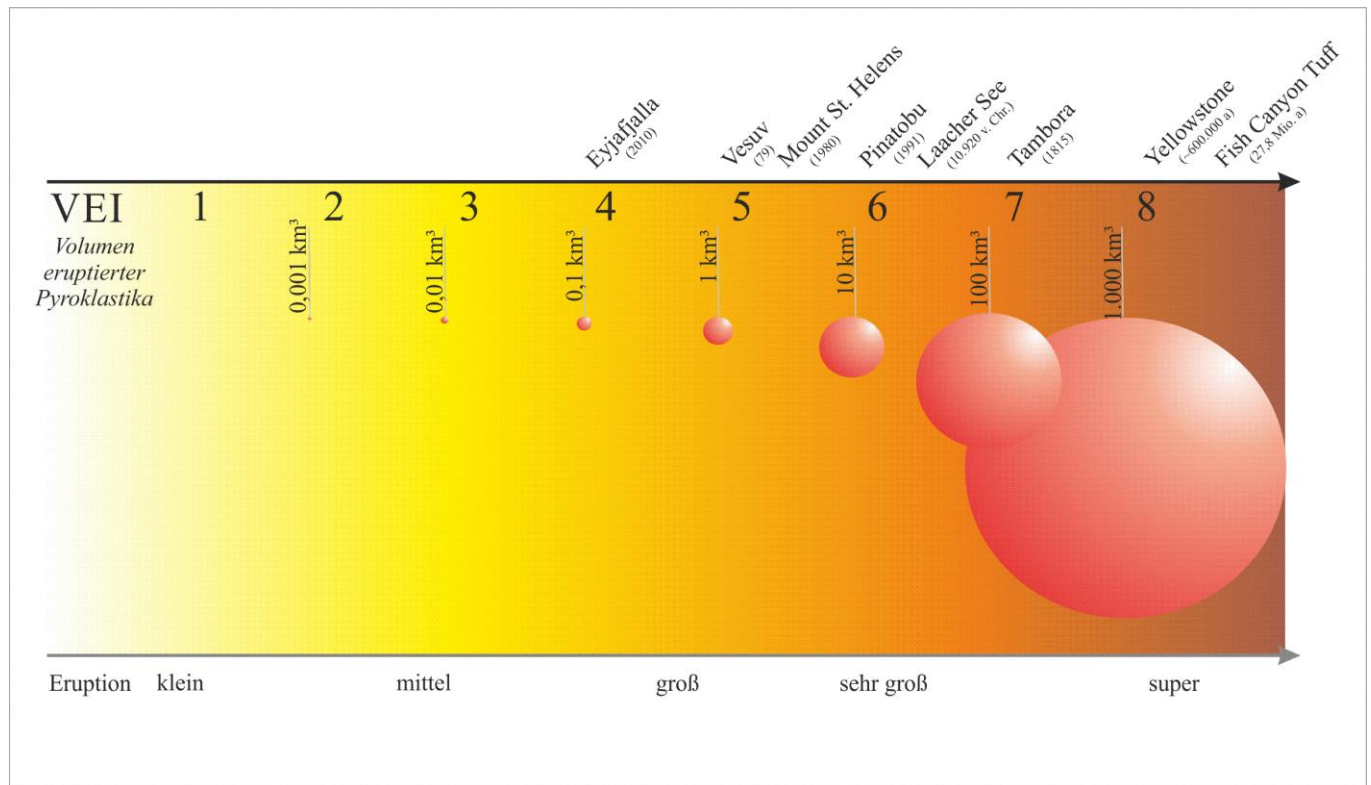


Abbildung 1: logarithmische Skala des Vulkanexplosivitätsindex (VEI; nach NEWHALL & SELF 1982).

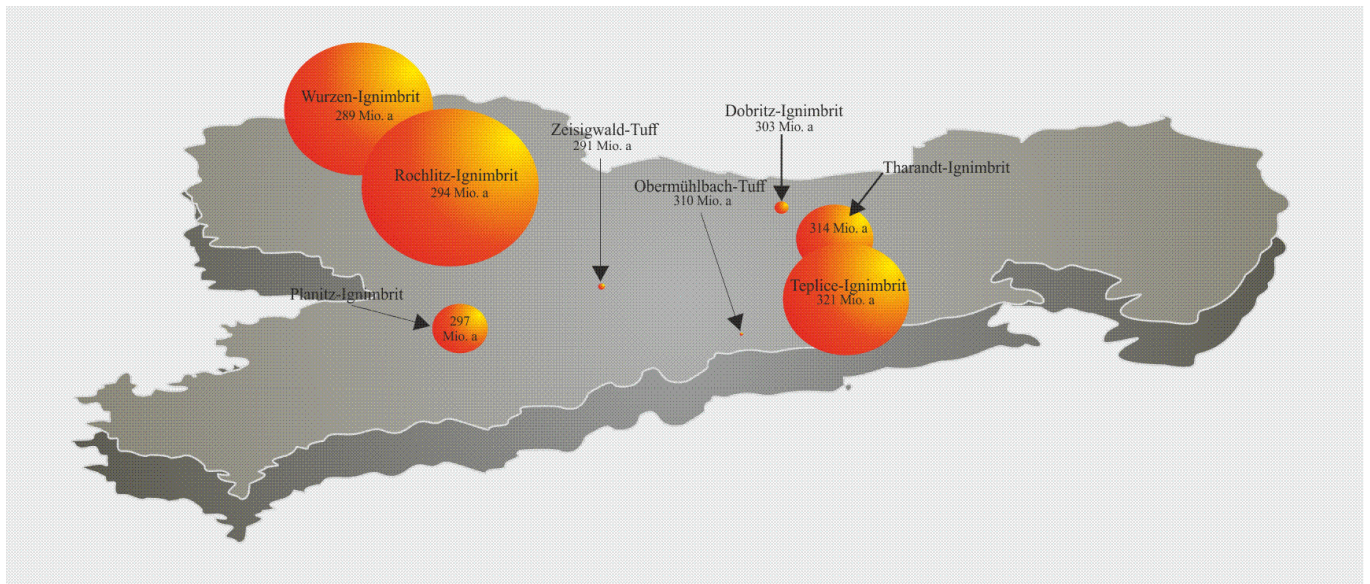


Abbildung 2: Größenvergleich pyroklastischer Ablagerungen des Permokarbons in Sachsen auf Basis ihrer flächigen Verbreitung. Vereinfachte Altersdatierungen für die pyroklastischen Ablagerungen entnommen aus: TICHOMIROWA (1997), HOFFMANN et al. (2013), LUTHARDT et al. (2018), LÖCSE et al. (2019) und CASAS-GARCÍA et al. (2019b).



Abbildung 3: Thermalquelle („Hot Spring“) bei Beppu auf der Insel Kyūshū in Japan (Foto: THIRAWARIN BUNYAPIPAT, Bangkok).

Die pyroklastischen Ablagerungen des NSVK zählen seit langem als wichtige Baustoffe bedeutender Bauwerke über die Grenzen des Freistaates hinaus. So wurde der Rochlitzer Porphyrtuff, der in den Steinbrüchen auf und um den Rochlitzer Berg ansteht (Abbildung 4), in Bauwerken wie der Kunigundenkirche (Rochlitz), der Stadthalle in Chemnitz, der Propsteikirche St. Trinitatis (Leipzig), dem Grunewaldturm (Berlin) und dem Grab von Immanuel Kant (Kaliningrad, Russland) verwendet. Während der Abbau des Kemmlitzer Porphyrs (Kaolin) und der Ignimbrite Wermsdorfs und Wurzens (Edelsplit & Schotter) noch heute ein wichtiger wirtschaftlicher Motor Nordsachsens darstellt, wird der Rochlitzer Porphyr mit seinen charakteristischen ziegelroten bis gelblichen Bändern bis heute als Naturwerkstein abgebaut (Abbildung 4).

In den letzten Jahren konnten durch Kooperationen zwischen dem Sächsischen Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG), der Technischen Universität Bergakademie Freiberg (TUBAF), dem Senckenberg Museum für Naturkunde Dresden, dem Museum für Naturkunde Berlin und dem Geoforschungszentrum Potsdam (GfZ) neue Erkenntnisse über Supervulkane in Sachsen erzielt werden. Das Hauptaugenmerk richtet sich dabei auf Magmenbildung und -aufstieg, der Rekonstruktion der Eruptionsprozesse und der Beziehung des Rochlitz-Ignimbrit mit pyroklastischen Ablagerungen in den umliegenden Becken. Dies sind wichtige Parameter, um die noch ungeklärten stratigraphischen Verhältnisse und erheblichen Kenntnisstandslücken in einen der großen Vulkanitkomplexe weltweit zu begreifen. Die Arbeit unterstützt somit maßgeblich die Verwaltungsaufgabe des LfULG, wie der *Geowissenschaftlichen Landesaufnahme*, der *Georisikenforschung* und auch die *Neuinterpretation der Rohstoffhoffigkeit* im Freistaat. Der ortsansässige nationale Geopark („Geopark Porphyryland – Steinreich in Sachsen e.V.“) profitiert zudem von den neu gewonnenen Erkenntnissen und ist ein entscheidender Beitrag zum Schutz und zur Erhaltung des geologischen Erbes im Freistaat Sachsen. Um die Ablagerungsverhältnisse und die Rekonstruktion des Magmareservoirs darzustellen, werden physische Charakteristika (Gesteins- und Mineraltexturen) mit geochemischen und mineralchemischen Untersuchungsmethodiken (röntgenanalytische und massenspektrometrische Verfahren) kombiniert.



Abbildung 4: Rochlitzer Porphyrtuff als Baustoff (Steinbruch am Rochlitzer Berg südwestlich von Rochlitz).

2 Regionalgeologischer Rahmen

Der Nordsächsische Vulkanitkomplex (NSVK) umfasst ein Areal von rund 2.000 km² östlich der sächsischen Metropole Leipzig. Seine Ausmaße entsprechen ca. 10 % der Landesfläche des Freistaats und reichen von Rochlitz im Süden bis Eilenburg im Norden, sowie von Borna im Westen bis Oschatz im Osten (Abbildung 5). Damit ist der NSVK eine der bedeutendsten geologischen Strukturen im Freistaat. Er beherbergt mit dem Wurzen- und dem Rochlitzer Vulkansystemen mindestens zwei vulkanische Komplexe gigantischen Ausmaßes (RÖLLIG 1969; EIGENFELD 1978; REPSTOCK et al. 2018). Während die Größe der Wurzen Caldera mit Durchmessern von 30 x 25 km definiert wurde (RÖLLIG 1969; REPSTOCK et al. 2018), lässt die Verbreitung des Rochlitz-Ignimbrits in der nördlichen Peripherie des Granulitmassivs auf eine Längsausrichtung der Caldera von 54 km schließen (Abbildung 5). Die exakte N-S-Ausdehnung ist schlecht definiert, da jüngere Vulkanite und Sedimentite der überlagernden Oschatz-Formation diese Calderenstruktur überdecken.

Eine moderne stratigraphische Gliederung dieses Vulkankomplexes wurde von WALTER (2006) unternommen, in dem er diesen in vier Formationen unterteilt: die *Kohren-*, *Rochlitz-*, *Oschatz-* und *Wurzen-Formationen* (Abbildung 5). Im Liegenden befindet sich die Kohren-Formation, welche die älteste stratigraphische Einheit des NSVK darstellt. Sie liegt diskordant auf dem variszisch gefalteten Grundgebirge sowie dem cadomischen Basement. Die 50 bis 200 m mächtige Formation besteht größtenteils aus siliziklastischen Gesteinen, die alternierend aus Konglomerat-, Sand- und Siltsteinabfolgen gebildet werden (WALTER 2006). Untergeordnet treten lakrustische und palustrische Sedimentschichten auf (ENGERT 1954). Erste Vulkanitabfolgen deuten einen basischen und intermediären Vulkanismus an („Andesitoide“, GLÄßER 1983), im oberen Bereich der Kohren-Formation treten die ersten sauren pyroklastischen Horizonte auf (z. B. Seifersdorf Tuff, GLÄßER 1977; Wendishain-Ignimbrit, RICHTER et al. 2013). Diese sauren Vulkanite bilden vermutlich die Vorläufer der Initialphase des Rochlitzer Supervulkans (Lastau-Ignimbrit, HÜBNER et al. 2016). Gelegentlich treten Pflanzenhäcksel von Cordaiten auf (WALTER 2006), welche eine ausgestorbene, paläozoische Ordnung baumförmiger Samenpflanzen darstellen (ROTHWELL 1988). Diese und andere Pflanzenrelikte beschränken die Kohren-Formation vage auf den Grenzbereich Karbon/Perm (DÖRING 1973). Eine absolute Altersdatierung an Zirkon eines pyroklastischen Horizontes in dieser Formation ergibt ein Alter von $298,3 \pm 9,1$ Millionen Jahren (Bohrung Ossa 102/90, HOFFMANN et al. 2013).

Im Hangenden der Kohren-Formation erstreckt sich eine erste mächtige und lateral weit verbreitete Ignimbritdecke, welche als Rochlitz-Formation zusammengefasst ist (EIGENFELD 1978). Bohrungen in diesem Gebiet weisen eine Mächtigkeit von maximal 400 m für diesen Ignimbrit auf (Bohrung Frauendorf 1/54, RÖLLIG 1976). Jedoch ist in keinem Aufschluss sowie in keiner Bohrung die komplette lithologische Abfolge dieses Pyroklastits erschlossen, sodass eine größere Mächtigkeit anzunehmen ist. Nach Eigenfeld (1978) können vier Einheiten innerhalb dieser Ignimbritdecke unterschieden werden: 1) *Döbeln-Rochlitz-Einheit* (R_I), 2) *Geithain-Einheit* (R_{II}), 3) *Großbothen-Einheit* (R_{III}) und 4) *Lampersdorf Einheit* (R_N). Die Abgrenzung dieser Einheiten erfolgt durch den Modalbestand der Hauptminerale Quarz, Alkalifeldspat und Pyroxen. Auf Grundlage dieser Daten wurde die Rochlitz-Formation bisher als Ablagerungen von Einzeleruptionen interpretiert (EIGENFELD 1978). Neuere Erkenntnisse sehen die ersten drei Einheiten als nahtlos ineinander übergehendes Produkt eines Haupteruptionsevents des Rochlitzer Supervulkans (HÜBNER et al. 2016; 2019). Eine Calderenstruktur in der Rochlitz-Formation wurde erstmals durch BENEK (1995) angenommen. Während der R_I die größte Verbreitung im gesamten Gebiet südlich der Wurzen-Caldera aufweist, sind die anderen Einheiten eher lokal begrenzt. So tritt die R_{II} -Einheit im Bereich von Colditz und Rochlitz auf, während die R_{III} -Einheit sich auf das Gebiet nordwestlich von Colditz im Randbereich zur Wurzen-Formation beschränkt. Eine Sonderstellung nimmt die Einheit R_N ein, da diese auf das nordöstliche Randgebiet begrenzt scheint und eine andere mineralogische und petrographische Signatur aufweist, womit sie eventuell in die überlagernde Oschatz-Formation eingeordnet werden kann (EIGENFELD 1978).

Die Basis der Rochlitz-Formation wurde mittels U/Pb-Datierung an Zirkon auf $294,4 \pm 1,8$ Millionen Jahre datiert (HOFFMANN et al., 2013).

Das Vorkommen des Rochlitz-Ignimbrit im südlich des NSVK angrenzenden Chemnitz-Becken ist Bestandteil aktueller Diskussion und Forschung. FISCHER (1991) sieht aufgrund der petrographischen, geochemischen und strukturellen Beschaffenheit dieser pyroklastischen Ablagerung eine Verbindung zur Rochlitz Caldera und interpretiert diesen als *Outflow*-Fazies. Diese Interpretation wurde durch das ermittelte Alter von $296,6 \pm 3$ Millionen Jahre bestärkt (HOFFMANN et al. 2013). Neuere Erkenntnisse stellen diese Behauptung jedoch in Frage, da chemische Substitutionsmechanismen in Mineralen wie Biotit in beiden Pyroklastiten unterschiedlich abliefen (REPSTOCK et al. 2019a). Unterstützt wird diese Vermutung ebenfalls durch Unterschiede in den Mineraltexturen (WEISE 2018; REPSTOCK et al. 2019a).

Der Rochlitz-Formation schließt sich im Hangenden die 50 bis 250 m mächtige Oschatz-Formation an, welche sich durch die Verzahnung sedimentärer Ablagerung mit eingeschalteten vulkanischen und vulkanosedimentären Einheiten definiert (WALTER 2006). Die Gesteine dieser Formation sind vor allem in der Bornaer Senke im Westen und im Bereich der Mügeln Senke im Osten verbreitet (BRÄUER 1977; WALTER 2006; ROMMEL 2017). Ein weiteres Vorkommen konnte durch die Bohrung Naunhof 176/73 bei Taucha unterhalb des Wurzen-Ignimbrit nachgewiesen werden („Tauchaer Schichten“, ROMMEL 2017; Abbildung 5). Ähnlich wie in der älteren Kohren-Formation gibt es hier lakustrine Horizonte („Salbitzer Schichten“, ZIEBELL 1974). Eine der bekanntesten nachgewiesenen lakustrinen Profile bildet ein Schurf nordöstlich von Börtewitz, in dem zahlreiche Fossilien (Amphibien, Fische sowie aquatische und terrestrische Arthropoden) vorkommen (WALTER 2010, GOLD 2011). Dieser Profilabschnitt lässt eine biostratigraphische Korrelation mit Amphibien der Goldlauter-Formation des Thüringer Waldes zu (WALTER 2010), was durch eine $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ -Altersdatierung an Zirkon eines pyroklastischen Horizontes der Oschatz-Formation bestätigt wird (GOLD 2011; U. LINNEMANN in WALTER 2012). Unter den Vulkaniten bilden der Neumühlen, Gattersburger und der Kemmlitzer Porphyrr größere Lavenstrukturen (RÖLLIG 1976), außerdem stellen der Dornreichenbacher Ignimbrit (FISCHER 1968; RÖLLIG 1969) und der Rochlitzer Tuff (EISSMANN 1967) größere pyroklastische Einheiten dar.

Das zweite große Eruptionseignis ist in den pyroklastischen Ablagerungen und vergesellschafteten Subvulkaniten der Wurzen-Formation dokumentiert (RÖLLIG 1969; GLÄßER 1983). Die pyroklastischen Ablagerungen werden in zwei Präcaldera-Ignimbrite (Wermsdorf- und Cannewitz-Ignimbrit) und einen mächtigen *monotonous intermediate* Intracaldera-Ignimbrit unterschieden (Wurzen-Ignimbrit, REPSTOCK et al. 2018). Während der Wermsdorf- und der Cannewitz-Ignimbrit als initiale vulkanische Aktivität der Wurzen Supereruption gesehen werden, ist der Wurzen-Ignimbrit das Resultat der Haupteruptionsphase. In der Spätphase kam es zur Intrusion von Granitporphyren, aber auch von mafischen und felsischen Gängen (RÖLLIG 1969; GLÄßER 1983; REPSTOCK et al. 2018). Die Wurzen-Formation hat eine Gesamtmächtigkeit von über 650 m (Bohrung 1519A/82, WALTER 2006), wobei bisher lediglich 150 m Mächtigkeit für die pyroklastische Ablagerung dokumentiert sind (Bohrungen im Steinbruch Großsteinberg bei Grimma, REPSTOCK et al. 2018). Innerhalb der permokarbonen pyroklastischen Ablagerungen Mitteleuropas gelten der vitrophyrische Ignimbrit der Planitz-Formation im Chemnitz Becken und der Wurzen-Ignimbrit des NSVK als besonders „frisch“, während die meisten dieser Gesteine Alterationen aufweisen. So finden sich im Wurzen-Ignimbrit gut erhaltene Minerale, wie die seltenen Pyroxene Ägirinnaugit und Pigeonit (REPSTOCK et al. 2016). Anhand von röntgenanalytischen Untersuchungsmethoden an verschiedenen Mineralen lässt sich ein System aus verschiedenen langlebigen Magmenkammern bis in eine Tiefe von 25 km rekonstruieren (REPSTOCK et al. 2019b). WENDT et al. (1995) ermittelten mittels verschiedener Datierungsmethoden Alter von $285,6 \pm 1,1$ Ma ($^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ Zirkonaltersdatierung), 284 ± 11 Ma ($^{147}\text{Sm}/^{143}\text{Nd}$ Gesamtgesteinsdatierung) und 287 ± 5 Ma ($^{87}\text{Rb}/^{87}\text{Sr}$ Gesamtgesteinsdatierung) für den Ignimbriten. HOFFMANN et al. (2013) bestätigten mittels $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ SHRIMP-Zirkondatierung $289,3 \pm 4,1$ Ma and $290,2 \pm 4,1$ Ma diesen Wert.

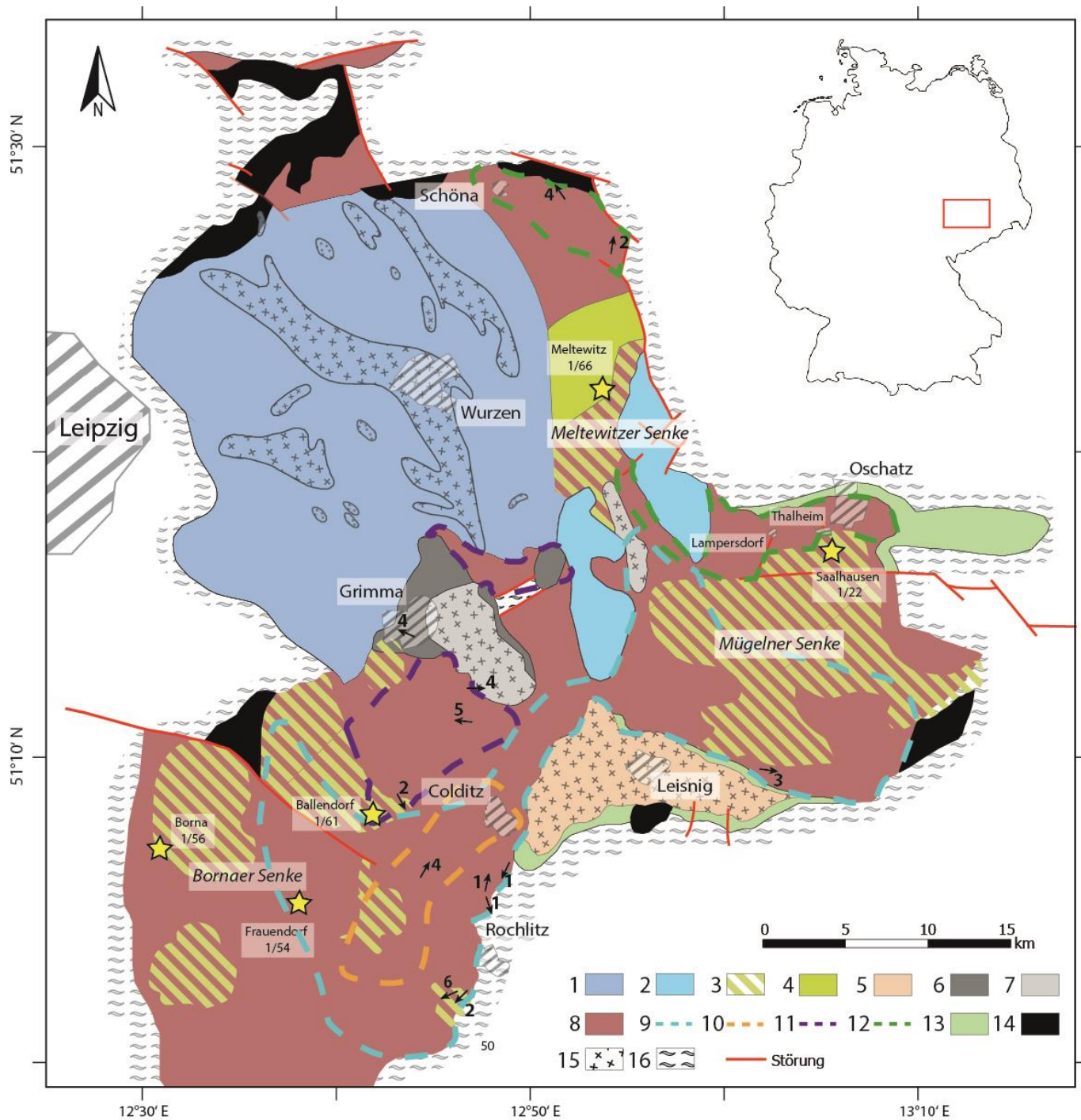


Abbildung 5: Vereinfachte geologische Karte des Nordsächsischen Vulkanitkomplexes ohne Deckgebirge (verändert nach RÖLLIG 1969; Walter 2006; Rommel 2017). Sterne markieren wichtige Bohrungen, welche dieser Arbeit zu Grunde liegen. Einfallrichtung und Einfallswinkel der Fiamme sind durch Pfeile und Zahlwerte dargestellt. Signaturen: 1 – Wurzen-Ignimbrit, 2 – Wernsdorf-Ignimbrit, 3 – Oschatz Fm. undifferenziert, 4 – Dornreichenbacher Porphy, 5 - Leisniger Porphy, 6 – Gattersburger Porphy, 7 – Grimmaer Porphy, 8 – Rochlitz Ignimbrit (undiff.), 9 – 12 Verbreitungsgebiet der Rochlitzer Untereinheiten nach Eigenfeld (1978) 9 – R_I, 10 – R_{II}, 11 – R_{III} 12 – R_N, 13 – Kohren Fm., 14 - Andesitoide, 15 – Subvulkanit, 16 – Cadomisches und Variszisches Grundgebirge.

3 Methodik

3.1 Probenahme und Präparation

Die Probenahme erfolgte an 70 Oberflächenaufschlüssen (Anhang) innerhalb des Nordsächsischen Vulkanitkomplexes, sowie an 49 Bohrkernen in den Bohrkernlagern des Sächsischen Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie. Aufschlüsse und Bohrkernkerne wurden detailliert aufgenommen und anschließend Probenentnahmepunkte für die Dünnschliffherstellung ausgewählt. In den Aufschlüssen und Steinbrüchen wurden die Proben mittels Geologenkompass orientiert entnommen, um Oben-Unten-Kriterien beizubehalten und das Einfallen der Fiamme zu dokumentieren. Ihre Orientierung kann auf die Lage eines möglichen Eruptionszentrums deuten.

Die Präparation der Gesteinsanschliffe und polierten Dünnschliffe erfolgte in der Präparation des Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie am Standort Freiberg, am Institut für Geologie der TU Bergakademie Freiberg und am Institut für Mineralogie der Universität Hamburg. Die Herstellung von Gesteinsanschliffen empfiehlt sich stets dann, wenn interne Strukturen und Texturen am frischen Bruch nicht in Erscheinung treten oder wenn das Gestein von außen stark verwittert ist oder unschön erscheint. Dabei wird die zersägte Probe auf einer Schleifscheibe zunächst plan geschliffen und anschließend auf einer Politurscheibe glänzend poliert.

Zur Dünnschliffherstellung werden möglichst frische Proben ausgewählt und gesägt bis diese auf ein Objektträgerglas passen. Bevor dieses auf das Objektträgerglas geklebt wird, wird eine Seite plan geschliffen. Danach wird das Präparat klein gesägt und unter der jeweiligen Verwendung einer „Logi Tech LP 50“-Schleifmaschine auf eine Schliffdicke von zunächst 30 µm gebracht. Um die genaue Schliffdicke von 25 µm zu erhalten, muss das Präparat mit 800µ und 1200µ Siliziumcarbid geschliffen werden. Hierfür wird ein ausgewähltes Mineralkorn auf die definierte Interferenzfarbe unter stetiger Kontrolle im Polarisationsmikroskop herunter geschliffen. Die Politur des Dünnschliffs erfolgt auf einer Politurscheibe unter stetiger Zugabe einer Al₂O₃-Kolloidallösung. Polierte Dünnschliffe sind wichtig, um die Gesteine mittels röntgenanalytischer Verfahren, wie dem Rasterelektronenmikroskop und der Elektronenstrahlmikrosonde, zu untersuchen.

Bei der Herstellung der Schwermineral- bzw. der Zirkonpräparate für die Altersdatierung wurden die Proben zunächst im Selfrag-Gesteinsfragmentierungslabor der TU Bergakademie Freiberg mittels gepulster Hochspannungsentladung gebrochen (Probenliste siehe Tabelle 1). Dabei verläuft die Bruchlinie vorwiegend entlang der Korngrenzen innerhalb der Gesteinsprobe. In dem gewonnenen Probenmaterial aus losen Körnern müssen anschließend die Schwerminerale (Minerale mit einer Dichte von mindestens 2,9 g/cm³) herauspräpariert werden. Das Mineral Zirkon (Dichte: 4,6 bis 4,7 g/cm³), als wichtiges Datierungsobjekt, bedarf bereits einer Trennflüssigkeit für größere Dichten, weshalb Diiodmethan (CH₂I₂) zur Separation benutzt wurde (Trennung der Dichtefraktion über 3,3 g/cm³). Anschließend wurde der Zirkon unter dem Stereomikroskop heraussepariert und auf einem Objektträgerglas (Körnerpräparat) fixiert.

**Tabelle 1: Liste der Probenahme für die Schwermineralanalyse (Koordinaten in UTM-Koordinaten).
Abkürzungen: R_I – Rochlitz I, R_{II} – Rochlitz II, R_{III} – Rochlitz III, R_N – Rochlitz Nord, KP –
Kemmlitzer Porphyr.**

Probennummer	Formation	Lithologie nach EIGEN- FELD (1978)	Lokalität	Z	N
MH-R-10	Rochlitz	R _I	Polkendorf	33U 354375	5671640
MH-R-32	Rochlitz	R _{II}	Colditz (nördl. Ortsrand)	33U 346517	5667108
MH-R-49/1	Rochlitz	R _N	Wildschütz	33U 350995	5703696
MH-R-50	Rochlitz	R _N	Schildauer Berg, Wittes Steinbruch	33U 353874	5700388
MH-R-54/1	Rochlitz	R _{III}	Kössern, Steinklippen an der Mulde	33U 344422	5674351
MH-R-58	Rochlitz		Rochlitzer Berg	33U 343668	5655257
MH-O-07	Oschatz	KP	Steinbruch Zetschlig, Schleben	33U 362477	5678785
MH-O-08	Oschatz	KP	Börtewitz	33U 359583	5676761
Mle	Rochlitz	R _I	Bohrung Meltewitz 1/66	33U 353298	5692214
Ba 1/61	Rochlitz	R _{III}	Bohrung Ballendorf 1/61	33U 338666	5666933

3.2 Analytische Verfahren

3.2.1 Mikroskopische Bildanalyse

Die mikroskopischen Messaufnahmen und Bildanalyse erfolgte mit dem *Keyence VHX 5000* im Fachbereich Paläontologie-Stratigraphie der TU Bergakademie Freiberg. Dabei werden durch die mit dem Mikroskop verbundene Kommunikationssoftware eine Quantifizierung der Verhältnisse im Mineralmodalbestand, die Korngrößenverteilung der Einsprenglinge und granulometrische Messverfahren an den juvenilen Fragmenten (Fiamme, vulkanisches Glas) sowie der Mineralkristalle analysiert und bestimmt. Um die Analysen bestmöglich anzuwenden wurden stetig verschiedene mikroskopische Verfahrenstechniken, wie Auflicht-, Durchlicht- und Reflektionsmikroskopie mit unterschiedlichen Helligkeits- und Kontraststufeneinstellungen, kombiniert. Die mikroskopische Bildanalyse hilft der Einordnung pyroklastischer Ablagerungen im Hinblick auf die Klassifikation nach HILDRETH (1981) und einer Faziesanalyse (CHEN et al. 2019).

3.2.2 Gesamtgesteinsgeochemie

Die chemischen Analysen am Gesamtgestein wurden in den zertifizierten Laboratorien *Bureau Veritas Mineral Laboratories* in Vancouver (British Columbia, Kanada) und *ALS Minerals-Geochemistry* in Dublin (Irland) durchgeführt. Es wurden 72 Proben der Rochlitz-Ignimbrite im Nordsächsischen Vulkanitkomplex und 88 Proben an

den möglichen Äquivalenten im Chemnitz Becken entnommen. Dabei wurden die analytischen Methoden der Röntgenfluoreszenzanalysen (RFA) und der Massenspektroskopie mit induktiv gekoppeltem Plasma (ICP-MS) kombiniert angewendet. Bei der RFA werden die zu untersuchenden Elemente, bzw. deren Oxide, durch den Einfluss einer Röntgenstrahlung angeregt. Als Strahlungsquelle dient eine Röntgenröhre in der eine Anode durch einen Elektronenstrahl beschossen wird. In der Gesteinsgeochemie eignet sich diese Methodik besonders zur Bestimmung der Hauptelementoxide (wie SiO_2 , Na_2O , Al_2O_3 und K_2O), nicht aber zur Neben- und Spurenelementanalytik.

Refraktärmetalle (Metalle der 4. bis 6. Nebengruppe im Periodensystem) sowie die Metalle der Seltenen Erden (Sc, Y, La, Ac, Lanthanoide, Actinoide) lassen sich mittels ICP-MS charakterisieren. Dabei wird die Probe soweit erhitzt, dass diese verdampft und in ihre einzelnen elementaren Bestandteile ionisiert wird. Anschließend werden diese im Plasma generierten Ionen durch ein Massenspektrometer detektiert. Diese Methode eignet sich im hohen Maße zur Untersuchung von kleinsten Konzentrationen, da ihre Nachweisgrenzen sehr gering sind (im Nanogramm pro Liter-Bereich). Diese Untersuchungen sind notwendig, um das Gestein gemäß ihrer chemischen Zusammensetzung zu bestimmen und geochemische Charakteristika hinsichtlich ihres Ursprungs zu erkennen (z. B. WINCHESTER & FLOYD 1977; PEARCE 1996; LEMAITRE et al. 2002). Um eine komplettes Bild über die geochemischen Verhältnisse des Rochlitz Vulkansystems zu erhalten, wurden zusätzlich Literaturdaten aus EIGENFELD (1978), WETZEL et al. (1995), FISCHER (1991) und REPSTOCK et al. (2019a) zur Interpretation herangezogen.

3.2.3 Rasterelektronenmikroskop und Elektronenstrahlmikrosonde

Die semiquantitativen Modalanalysen an Kristall- und Glasfragmenten in den untersuchten Pyroklastiten und kohärenten Vulkaniten wurden mittels einer automatisierten mineralogischen Untersuchungsmethodik (*Mineral Liberation Analysis*, MLA) am Rasterelektronenmikroskop Quanta 650 FEG-MLA650F und der Kommunikationsoftware MLA 3.3 am Helmholtz-Institut Freiberg für Ressourcentechnologie durchgeführt. Die Analysen wurden mit einer Beschleunigungsspannung von 25kV und einer Stromstärke von 10nA durchgeführt, die Kalibrierung der Graustufen der Rückstreuelektronenbilder (*back scattered electron image*, BSE) erfolgt an gediegenem Kupfer. Durch die kombinierte Anwendung von BSE-Graustufen und einer semiquantitativen chemischen Analyse mittels energiedispersiven Röntgenstrahls (EDX) wird eine Kartierung der Mineralphasen in der Probe ermöglicht (GXMAP-Routine, FANDRICH et al. 2007), wodurch ein dichtes Gitter von ca. 1600 EDX-Spektren pro mm^2 erzeugt wird. Die verwendete Software (MLA 3.3) ermöglicht darüber hinaus die Berechnung einer Korngrößenverteilung, welche in den untersuchten pyroklastischen Ablagerungen die Grundmasse vernachlässigt. Die chemischen Analysen des Rasterelektronenmikroskops basieren auf der energiedispersiven Röntgenspektroskopie, in der ein Elektronenstrahl ein kernnahes Elektron aus dem Analysepunkt schlägt. Das dabei entstehende Röntgenspektrum wird von einem Halbleiterdetektor aufgenommen und lässt somit auf die chemische Zusammensetzung qualitativ schließen.

Tabelle 2: Parameter der quantitativen Bestimmung mittels Elektronenstrahlmikrosonde.

Element/Oxid	Spektrallinie	Standards	Zählzeit
Na ₂ O	Na K α	Albit (NaAlSi ₃ O ₈)	80 s
MgO	Mg K α	Diopsid (CaMg[Si ₂ O ₆])	80 s
Al ₂ O ₃	Al K α	Yttrium-Aluminium-Granat (Y ₃ Al ₂ [AlO ₄] ₃)	60 s
SiO ₂	Si K α	Wollastonit (Ca ₃ [Si ₃ O ₉])	60 s
K ₂ O	K K α	Orthoklas (KAlSi ₃ O ₈)	120 s
CaO	Ca K α	Diopsid (CaMg[Si ₂ O ₆])	120 s
BaO	Ba L α	Benitolit (BaTi[Si ₃ O ₉])	140 s
Fe ₂ O ₃	Fe K α	Hämatit (Fe ₂ O ₃)	140 s
MnO	Mn K α	Bustamit (Ca ₃ (Mn,Ca) ₃ [Si ₃ O ₉] ₂)	140 s
TiO ₂	Ti K α	Rutil (TiO ₂)	140 s
Cr ₂ O ₃	Cr K α	Chromit (Cr ₂ O ₃)	140 s

Die quantitativen mineral- und glaschemischen Analysen erfolgten an den Elektronenstrahlmikrosonden JEOL JXA-8900RL am Institut für Werkstoffwissenschaften der TU Bergakademie Freiberg und JEOL JXA-8500F Feldemissionselektronenstrahlmikrosonde am Museum für Naturkunde Berlin. Beide Instrumente verwenden die Messbedingungen von 15kV und 20nA, die verwendeten Spektrallinien, Standards und Zählzeiten sind in Tabelle 2 dargestellt. Die Kalibrierung der Elektronenstrahlmikrosonde am Museum für Naturkunde Berlin erfolgt durch die Verwendung der *Smithsonian Microbeam Standards* des *Smithsonian Natural Museum of Natural History*. Elektronenstrahlmikrosonden sind für die quantitative Elementanalyse an Festkörperoberflächen essentiell, da die Analysen auf einen wellenlängendispersiven Elektronenstrahl basieren. Dabei regt ein Elektronenstrahl, wie beim Rasterelektronenmikroskop, ein für ein Element charakteristisches Röntgensignal in der Probe an. Der Unterschied besteht darin, dass ein auf ein bestimmtes Element kalibrierter Spektrometerkristall als Empfänger der Röntgensignatur fungiert. Dadurch ist es möglich die genaue chemische Zusammensetzung des Analysepunkts zu bestimmen.

3.2.4 Laser-Ablation ICP-MS

Untersuchungen von Spurenelementen (U, Pb und Ti) an Zirkon aus dem Rochlitzer Vulkansystem wurden mittels *Laser Ablation Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry* (LA ICP-MS, deutsch: Laserablation Massenspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma) in der Sektion Geochronologie am Senckenberg Naturhistorische Sammlungen in Dresden durchgeführt. Die Messparameter der Analysen sind: Spotgröße 35 μ m bei 6mJ, einem Vorvakuum bei $1,99 \times 10^{-3}$ mbar und einem Hochvakuum bei $3,23 \times 10^{-7}$ mbar, Mineralstandard ist der GJ1 bei 7×10^7 cps (engl. *counts per second* = Zählimpulse pro Sekunde), der Argon-Fluss liegt bei 0,832 l/min.

Die Verwendung dieser Methode ist in den vergangenen Jahren immer mehr in den Fokus der aktuellen geologischen und mineralogischen Forschungen gerückt. Sie ist ein wichtiges Instrument, um Spurenelemente und ihre Isotope in

Mineralen quantitativ zu bestimmen. Die gewonnenen Isotope geben Aufschluss über die Kristallisationsbedingungen und Kristallisationsalter der untersuchten Minerale. Bei der Methode wird ein Laserstrahl auf eine Probenoberfläche fokussiert, um feinste Partikel herauszulösen (Prozess der Laserablation). Diese Partikel kommen in ein Massenspektrometer, um dort als Plasma ionisiert zu werden. Diese Ionen werden durch ein Spektrometer detektiert und erlauben somit Rückschlüsse auf die chemische Zusammensetzung der untersuchten Kristalle.

4 Auswertung

4.1 Aufschlusssituation und Beschreibung

Die Rochlitz-Formation im NSVK umfasst eine Großzahl ehemaliger Steinbrüche sowie größere und kleinere Aufschlüsse (Abbildung 5, Anhang). Seit dem Mittelalter wurden die Vulkanite der Rochlitz Formation abgebaut und vor allem für die Herstellung von Mühlsteinen verwendet. Aufgrund seiner hohen Porosität, der geringen Härte und der niedrigen Widerstandsfähigkeit wird er jedoch kaum mehr bergbaulich gewonnen. Es können im NSVK dadurch eine Vielzahl an ehemaligen, auflässigen Steinbrüchen sowie größere und kleinere Aufschlüsse gefunden werden, die Zeugen einstiger Bergbautätigkeit sind (Abbildung 5, Anhang). Lediglich am Rochlitzer Berg - etwa 2,5 km südwestlich von Rochlitz - wird noch im größeren Umfang der Rochlitzer Porphyrtuff als Bau- und Dekostein abgebaut (Abbildungen 4, 6). Im Rahmen der Untersuchungen zur vulkanosedimentäre Faziesanalyse und Geochemie des Rochlitzer Vulkansystems wurden 63 Oberflächenaufschlüsse im Rochlitzer Ignimbrit sowie 19 in der Oschatz-Formation und zwei in der Kohren-Formation beprobt. EIGENFELD (1978) dokumentierte insgesamt 238 Aufschlüsse in der Kohren-, Rochlitz- und Oschatz-Formation, wobei viele davon durch die aktive Landwirtschaft und Landschaftsgestaltung bereits verfüllt und nicht mehr zugänglich sind. Außerdem sind einige Aufschlüsse aufgrund der fortschreitenden Vegetation ebenfalls nicht mehr vorhanden.

Eine Vielzahl der Aufschlüsse in der Rochlitz-Formation ist durch eine deutliche Klüftung des Gesteins charakterisiert. Einige der Klüfte werden nach EIGENFELD (1978) als Abkühlungsklüfte interpretiert. Der Rochlitzer Ignimbrit weist nahezu immer eine umfassende Alteration und Verwitterung auf (vgl. Kapitel 4.3.2) und kann in einigen Fällen grusig anstehen. Der ignimbritische Charakter dieses mächtigen Gesteinsverbands wird durch die typischen Fiamme am frischen Gestein sichtbar. Sie sind typischerweise rotbraun bis violett verfärbt (Abbildung 7a), was auf einen erhöhten Anteil an verschiedenen Eisenmineralen zurückzuführen ist. Zum Teil sind sie farblich von der Grundmasse des Gesamtgesteins kaum zu unterscheiden (Abbildung 6). In einigen Aufschlüssen die Fiamme durch Verwitterungsprozesse soweit zersetzt, dass bis zu dezimetergroße langgestreckte Hohlräume im Ignimbrit zurückgeblieben sind (Abbildung 7b).

Die wohl bekanntesten Steinbrüche des Rochlitzer Porphyrs sind der Seidelbruch und der Gleisbergbruch am Rochlitzer Berg (Abbildung 8). Der Abbau des Werksteins kann am Rochlitzer Berg bis ins 10. Jahrhundert nachvollzogen werden. Seiner typischen rötlichen Farbe mit den zierenden gelblichen Bändern verdankt das Gestein den Beinamen „Sächsischer Marmor“, welcher zahlreiche Bauwerke und Gebäude europaweit ziert. Gerade der Rochlitzer Porphyr vom Rochlitzer Berg kann an Schlössern (Rochlitz, Augustusburg) und Burgen (Wechselburg), Kirchen (Rochlitzer Kunigundenkirche, Leipziger Thomaskirche), Turmbauten (Grunewaldturm in Berlin Charlottenburg-Wilmersdorf), geschichtsträchtigen Denkmälern („Block der Frauen“ von Ingeborg Hunziger in Berlin-Mitte) und Grabstätten (Grabmal von Immanuel Kant, im heutigen Kaliningrad) bewundert werden (Abbildung 8). Tagesausflügler und Touristen können aber auch schon in Steinbruchnähe den Friedrich-August-Turm mit seinen steinernden Löwen am Eingangsbereich bewundern. Die ehemaligen Abbaukanten der Steinbrüche rund um den Rochlitzer Berg dienen Extremsportlern heute als beliebte Kletterwände.



Abbildung 5: Abbau des Rochlitzer Porphyrtuffs im aktiven Steinbruch am Rochlitzer Berg. Ausschnitt rechts unten zeigt einen Anschlag des Rochlitzer Porphyrtuffs mit deutlich sichtbaren Fiamme, Rauchquarz (Qz) und rötlichen Feldspat (Fsp).

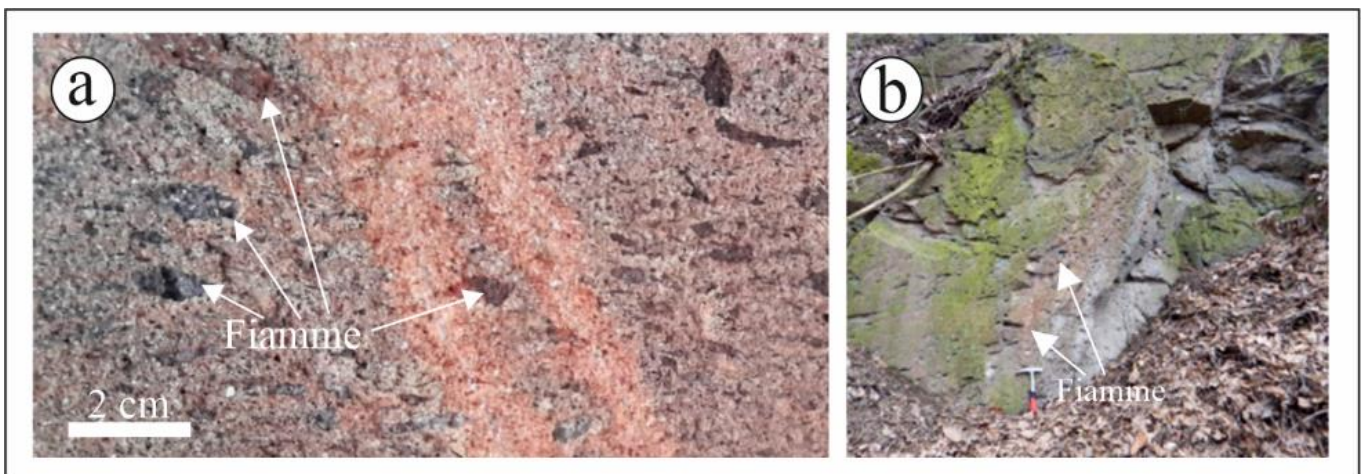


Abbildung 6: a) Rochlitzer Porphyrtuff am Sockel des Grunewaldturms in Berlin (Bezirk Charlottenburg-Wilmersdorf) lässt deutlich rotbraune und violette Fiamme erkennen; b) Rochlitz-Ignimbrit mit herausgewitterten Fiamme (Aufschluss östlich Geithain an der Bundesstraße 7).



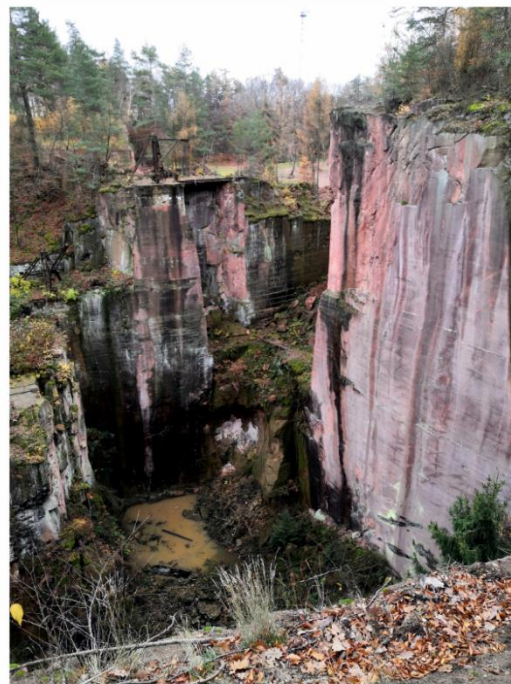
Grabmal Immanuel Kant
(Kaliningrad, Russland)



Block der Frauen - Rosenstraßen-Protest
(Berlin-Mitte)



Friedrich-August-Turm
(Rochlitz)



Gleisbergbruch am Rochlitzer Berg
(Rochlitz)



Grunewaldturm
(Berlin-Grunewald)



Untergrundmessehalle
(Leipzig)



Gartenfiguren am Rochlitzer Berg
(Rochlitz)

Abbildung 7: Der Rochlitzer Porphyrtuff, wie er etwa am Gleisbergbruch ansteht, findet sich an vielen Bauwerken, Denkmälern und Kunstwerken wieder. So im Grabmal des deutschen Philosophen Immanuel Kant (1724–1804) im heutigen Kaliningrad, dem Friedrich-August-Turm am Rochlitzer Berg, den Untergrundmessehallen in Leipzig mit Schmuckdetails von Otto Droge (Foto: PETER ROLLE, Leipzig), dem Denkmal „Block der Frauen“ in Berlin-Mitte zum Gedenken an den Rosenstraßen-Protest von 1943 (Foto: TUNCHIRA REPSTOCK, Berlin), der Sockel des Grunewaldturms in Berlin erbaut 1897 bis 1899 vom Architekten Franz Schwechten und die Gartenfiguren am Rochlitzer Berg.

Neben den Aufschlüssen am Rochlitzer Berg lassen sich lateral weitaushaltende Aufschlüsse mit mehreren Metern Höhe nur an wenigen Stellen finden (z. B. Scheergrund im Südosten der Rochlitz-Caldera unweit des Leisniger Porphyrs). Das Gestein zeigt, wie am Rochlitzer Berg auch, eine rötliche Färbung der Grundmasse – jedoch einen merklich höheren Phänokristallgehalt, der makroskopisch von Rauchquarz und Feldspat dominiert wird. Durch die Intrusion des Leisniger Porphyrs kam es zu einer Reaktion zwischen dem Wärmestrom und den hydrothermalen Wässern, wodurch phreatische pyroklastische Gänge gebildet wurden.

In vielen Aufschlüssen, wie etwa die Aufschlüsse an der Rodaer Straße in Wagelwitz bei Mutzschen oder der Scheergrund bei Leisnig, zeigt der Rochlitz-Ignimbrit eine tiefrote bis violette Verfärbung der Grundmasse. Hier treten Einsprenglinge aus Rauchquarz und Kaolinit in Erscheinung, welche Pseudomorphosen nach Feldspat darstellen. Ferromagnesische Silikate, wie etwa Pyroxen oder Biotit, sind vollständig zersetzt oder zu Eisenoxiden umgewandelt. Andere Aufschlüsse, wie etwa entlang des Bahndamms bei Kössern (Abbildung 9a), zeigen eine grünliche Grundmasse – welche auf Chloritisierung und Epidotisierung des Gesteins deuten. Der Feldspat tritt hier in gelblicher Färbung in Erscheinung, während Chlorit sich dunkelgrün von der blässeren Grundmasse hervorhebt (Abbildung 9b).

Am Muldenufer zwischen Kössern und Höfgen stellen die sogenannten „Steinklippen“ einen besonderen Aufschluss dar (Abbildung 9c). Während oberhalb des Radweges im Waldgebiet des Müncherholz die grünliche Varität des Rochlitz-Ignimbrits ansteht, weist das Gestein über 50 m längs des östlichen Muldenufer eine dunkelgraue Grundmasse mit schwärzlichen Fiamme auf. Vermutlich hat die fluviale Erosion der Mulde Verwitterungskrusten entfernt und das frische Gestein freigelegt. Auf den ersten Blick lässt sich dieses Gestein kaum vom Wurzen-Ignimbrit unterscheiden, wie dieser in den Steinbrüchen Großsteinberg und Hengstberg (östlich und nördlich von Grimma) ansteht. Hier finden sich transparente Feldspatkristalle, die aufgrund ihrer mit der Lupe erkennbaren polysynthetischen Verzwilligung als Plagioklase identifiziert werden können. Seltener sind auch große Pyroxenkristalle mit bloßem Auge erkennbar. Eine solche frische Qualität der älteren Rochlitz-Ignimbrite im Nordsächsischen Vulkanitkomplex ist sonst nur vom 370 x 240 m großen Steinbruchsee Wildschütz südöstlich von Mockrehna (Landkreis Nordsachsen) bekannt. Wie am Muldenufer zwischen Kössern und Höfgen besitzt dieses Gestein eine tiefgraue Grundmasse, schwärzliche Fiamme und transparente Plagioklaskristalle.

Insgesamt ist das Gebiet des Nordsächsischen Vulkanitkomplexes überwiegend aufgrund der Erkundungsarbeiten der ehemaligen SDAG Wismut flächendeckend mit Bohrungen durchzogen. So sind 857 Bohrungen mit einer Teufe von mehr als 100 m im Gebiet des Rochlitzer Ignimbrits und der Oschatz-Formation abgeteuft worden. Einige wenige besitzen sogar eine Endteufe von mehr als 600 m. Da nicht alle dieser Bohrungen gekernt wurden bzw. heute noch Kerne vorhanden sind, konnten zahlreiche Bohrungen nur noch anhand der Schichtverzeichnisse bearbeitet werden. Zudem wurden einige Bohrkern während Aufräumarbeiten? stark verkürzt, wodurch der oft monoton ausgebildete Rochlitz-Ignimbrit entfernt wurde besonderes Augenmerk bei der Auswahl der Bohrkern wurde auf die Bohrung Meltewitz 1/66, die Bohrungen Ballendorf von 1961 und 1962 sowie die Bohrung Saalhausen 1/22, Borna 1/56 und Frauendorf 1/54 gelegt, da diese die Oschatz-Formation und die Rochlitz-Formation in großen Teilen abbilden und Einblicke in die verschiedenen Teilbecken liefern.

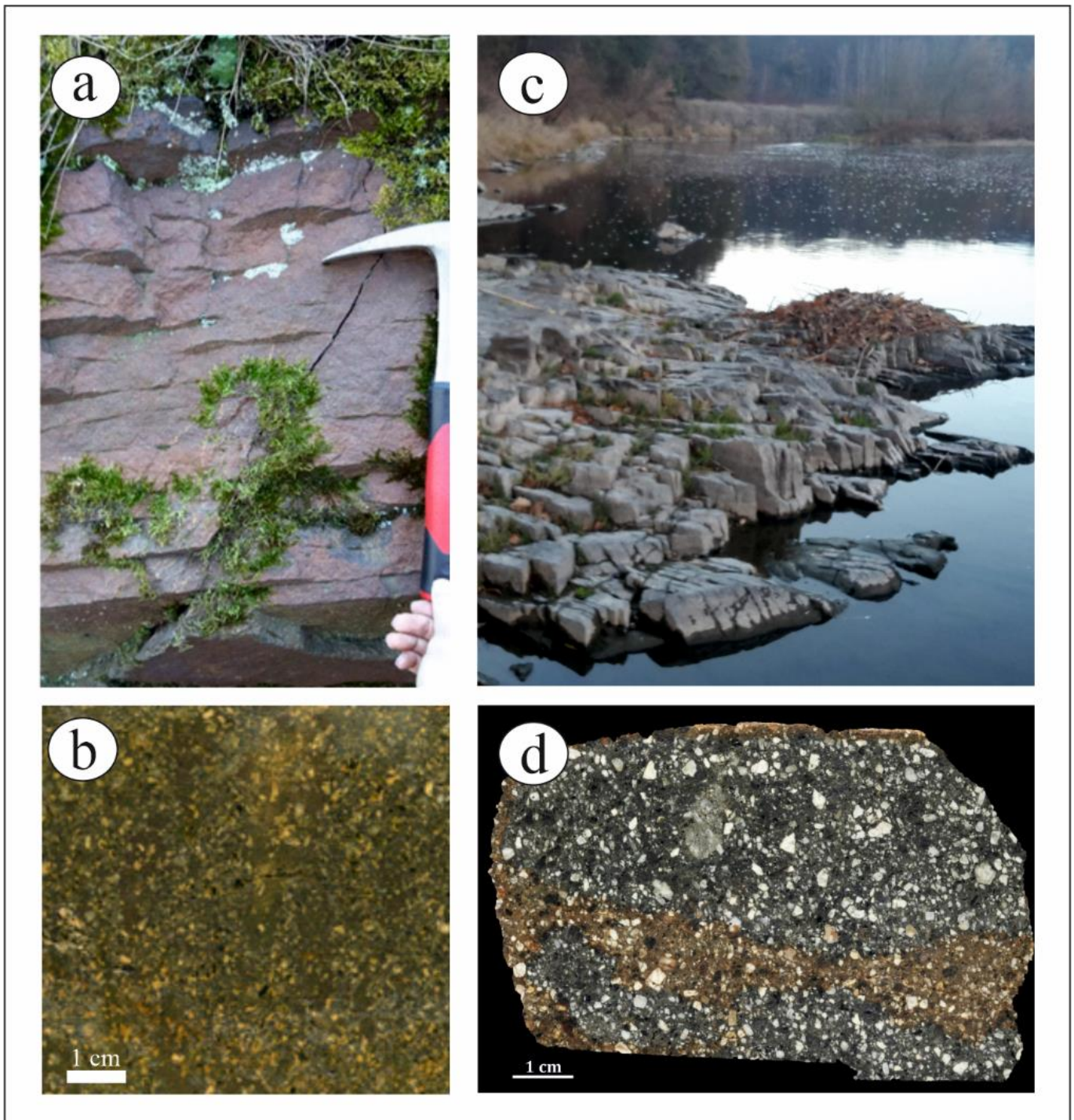


Abbildung 8: a) Aufschluss am Bahndamm, westlicher Ortsausgang von Kössern (Grimma, Landkreis Leipzig), zeigt im frischen Anschlag eine grünliche Verfärbung der Grundmasse (Rochlitz- β -Ignimbrit); b) Gesteinsanschliff zeigt deutlich die grünliche Grundmasse und gelblich verwitterte Feldspatkristalle; c) Steinklippen am Muldenufer zwischen Kössern und Höfgen (Grimma, Landkreis Leipzig) mit der dunkelgrauen Varietät des Rochlitz- β -Ignimbrits; d) Gesteinsanschliff des Rochlitz-N-Ignimbrits aus dem Steinbruch Wildschütz (Gemeinde Mockrehna, Landkreis Nordsachsen).

In den Gesteinen der Oschatz-Formation ist die Bandbreite der Aufschüsse ebenfalls sehr groß. So sind der Dornreichenbacher Ignimbrit und der Grimmaer Porphyry in großen aktiven und ehemaligen Steinbrüchen teilweise über mehrere hundert Meter hinweg aufgeschlossen (Abbildung 10). Ähnlich sieht es bei dem Kemmlitzer Porphyry aus, wobei dieser lediglich in seiner kaolinitisierten Form gut aufgeschlossen ist. Dafür sind Aufschlüsse des Buchheimer Porphyry und Frohburger Ignimbrits in der Bornaer Senke im Westen des NSVK nur schwer zu finden, da sie sich nicht als Werksteine eignen und auch keine Steilstufen ausbilden. Aus diesem Grund werden

hauptsächlich Bohrkerne zur Untersuchung genutzt. Bei der Dokumentation der mächtigen Sedimentabfolgen der Mügelner Senke im Osten des NSVK musste aufgrund fehlender Aufschlüsse und Steinbrüche ebenfalls auf Bohrungen zurückgegriffen werden.

Die Bohrung Meltewitz 1/66 wurde in der Meltewitzer Senke abgeteuft und hat eine Endteufe von 300 m. Dabei wurden etwa 80 m Rochlitz- α -Ignimbrit durchteuft, welcher keine internen Grenzen erkennen lässt. Im Liegenden sind der Kristallgehalt sowie die Kristallgröße etwas größer als im Hangenden, wobei kein einheitlicher Trend zum Top hin zu erkennen ist, eher drei „Finning-upward-Zyklen“. Bei den Fiamme ist weder in der Größe noch in der Anzahl ein Trend erkennbar. Auf den Rochlitzer Ignimbrit folgt ein etwa 100 m mächtiges monomiktetes Konglomerat mit massiger Struktur der Oschatz-Formation. Die Komponenten bilden eckige bis kantengerundete Bruchstücke eines rhyolithischen Vulkanits. Außerdem ist ein deutliches fining-up bei den Komponenten ausgebildet. Im Top des Konglomerats tritt eine Abfolge verschiedener Tuffe auf, die zum Teil subaquatisch abgelagert bzw. umgelagert wurden. Den Abschluss der Bohrung bildet der 45 m mächtige Dornreichenbacher Ignimbrit, welcher in der Bohrung stark alteriert als grünlich-weiße Ausbildung vorliegt.

Die Bohrungen Ballendorf von 1961 und 1962 bilden den nördlichen Teil der Bornaer Senke ab. Diese schließen einen größeren Bereich des Rochlitz- β -Ignimbrits auf, welcher ähnlich den Steinklippen am Muldenufer eine graue bis dunkelgraue Färbung aufweist. Zudem zeigt der Ignimbrit in dieser Bohrung einen geringeren Kristallgehalt und kleinere Kristallgrößen als für den Rochlitz- β -Ignimbrit üblich. Die Unterschiede besonders im geochemischen Befund sind jedoch nicht signifikant genug um einen gesonderten Lithotypen zu definieren. Im Hangenden folgt der Buchheimer Porphyry, bei dem es sich petrographisch ebenfalls um einen Ignimbrit handelt und der in Wechsellagerung mit dem Buchheimer Tuff auftritt. Weitere Bohrungen liegen zum Großteil verkürzt vor, wodurch kein durchgehender Aufschluss des Rochlitz-Ignimbrits und seinem Kontakt zur Oschatz-Formation dokumentierbar ist.

Bei der Dokumentation des Rochlitzer Ignimbrits zeigen sich drei Ausbildungsformen: 1) die massige Ablagerung über mehrere Zehnermeter hinweg (z. B. Rochlitzer Berg, Bohrung Meltewitz 1/66, Colditz), 2) horizontal fein- bis grobbankige Absonderung (z. B. Thümmlitzer Wald, Steinklippen, Kössern, Doberquitz, Steinbruch Rochlitzer Berg), 3) Ablagerung mit Fließgefüge (z. B. Polkenberg, Eulenberg).



Abbildung 9: Aufschluss des Grimmaer Porphyrs in der Nähe von Bahren entlang der Staatstraße 11.

4.2 Lithologie und Petrographie

4.2.1 Nordsachsen: Pyroklastische Ablagerungen

4.2.1.1 Rochlitz Ignimbrite

Der Rochlitz-Ignimbrit nimmt einen Großteil des südlichen und östlichen Bereiches des NSVK ein. Dieser wird durch einen hohen Kristallgehalt (35 bis 47 Vol.-%; Abbildung 11; Tabelle 3) und einen hohen Fiammeanteil charakterisiert. Letztere sind deutlich durch ihre linsenförmige Struktur von Größenordnungen im Milli- bis Zentimeterbereich zu erkennen. Im frischen schwärzlichen Gestein (Steinklippen Muldenufer, südlich von Höfgen) heben die Fiamme sich nur wenig farblich hervor, während der alterierte rötliche Bereich eine bräunliche bis violette Färbung der Fiamme aufweist. Seltener können karbonatisierte Fiamme aus dem Wirtsgestein herausgewittert sein. Obwohl eine Kristallisation der Grundmasse nach dem Erkalten der pyroklastischen Ablagerung stattgefunden hat, ist das für einen Ignimbrit typische eutaxitische Gefüge größtenteils erhalten. Dies deutet auf eine hohe Kompaktion und einen großen Verschweißungsgrad hin. Er lässt sich am Seitenverhältnis (engl. *aspect ratio*) der Fiamme ablesen (QUANE & RUSSELL 2005). Dabei wird der Wert der Längsachse durch die Querachse dividiert und diese Zahl von Eins subtrahiert. Daraus ergeben sich für die Rochlitzer Ignimbrite Verschweißungsgrade in den Bereichen um II und IV. Eine interessante Beobachtung ist, dass kein vertikaler Trend innerhalb des Rochlitz-Vulkansystems auftritt, wie Untersuchungen an der Bohrung Meltewitz 1/66 verdeutlichen. Ferner tritt im Rochlitz-Ignimbrit vitrophyrische Fazies auf (Lastau - basaler R_I, Ebersbach – R_{II}, Korpitzsch – R_I, JENTSCH 1979). Lediglich in der Region um Mutzschen lässt die relative grobe Kristallisation der Grundmasse keine Rückschlüsse auf das vulkanische Gefüge zu. Unter dem Mikroskop offenbaren sich eine hämatitisierte Grundmasse und kleine Kalifeldspat- und Quarzeinsprenglinge.

Der Einsprenglingsmodus besteht zum großen Teil aus Quarz, Kalifeldspat, Plagioklas und Biotit (Abbildung 11; Tabelle 3). Innerhalb der Verbreitung des Gesteins sind nur kleinere Schwankungen der *maximum particle size* (MPS, dt.: maximale Partikelgröße) von Quarz und Feldspat von 2,5 bis 4 mm Größe zu verzeichnen. Im Allgemeinen ist die Kornverteilung im Rochlitz-Ignimbrit als relativ gleichmäßig anzusehen (Abbildung 12a). So ist kaum verwunderlich, dass dieses Gestein im Vergleich zu seinem jüngeren Pendant, dem Wurzeln-Ignimbrit, einen niedrigeren Sortierungsgrad und somit eine bessere Sortierung aufweist (Abbildung 12b).

Quarz liegt eindeutig als Hochtemperaturmodifikation vor, welche sich in der pseudohexagonalen Struktur widerspiegelt. Der Erhalt dieser Struktur deutet auf eine rasche Abkühlung nach der Eruption hin. Zudem finden sich im Quarz die typischen Einbuchtungen (engl. *embayment*), welche auf Korrosion durch ein Ungleichgewicht mit dem umgebenden Magma deuten können (DONALDSON & HENDERSON 1988). Im Kalifeldspat tritt häufig feiner Hämatitstaub auf, während Plagioklas größtenteils serizitisiert, bzw. kaolinisiert vorliegt. Diese Formen der Alteration entstehen, wenn durch hydrothermale Lösungen die Alkali- und Erdalkalimetalle im Feldspat abgeführt werden (Hydratation). Ein für die Historie Sachsens wichtiges Mineral, welches durch diesen Prozess gebildet wird, ist das Alumohydrosilikat Kaolinit ($\text{Al}_4[(\text{OH})_8]\text{Si}_4\text{O}_{10}$).

Entgegen der Beobachtungen von EIGENFELD (1978) treten im gesamten Rochlitz-Ignimbrit Pseudomorphosen von Chlorit nach Pyroxen auf, wodurch die ursprüngliche Einteilung des Ignimbrits, in der Pyroxen nur im R_{III} vorkommt, in Frage gestellt werden kann. Bisher ist frischer Pyroxen im Rochlitz-Ignimbrit unbekannt, obwohl dieser im benachbarten Wurzeln-Ignimbrit (RÖLLIG 1969; REPSTOCK et al. 2018) und im Grimmaer Porphyry (ANEGG 1970) beschrieben wurde. Biotit zeigt meistens einen grünlichen Pleochroismus, welcher vorrangig mit der Alteration in Zusammenhang gesehen werden kann. Selten tritt dieser bräunlich bis grünlich auf. Sowohl Biotit als auch die Pseudomorphosen nach Pyroxen treten gemeinsam mit Plagioklas in glomerophyrischen Verwachsungen auf. Da Glomerophyre als Frühkristallite in einer Magmenkammer gelten (z. B.: ELLIS et al. 2013), sind diese ein Beleg für mehrere Magmenkammern im Rochlitz System. Wesentlich seltener treten granophyrische Verwachsungen von Quarz und Kalifeldspat auf. Diese besondere Textur entsteht in einer relativ flachen Magmenkammer, wenn Quarz und Kalifeldspat im Gleichgewicht zur einer wasserreichen Schmelze auskristallisieren (am sogenannten eutektischen Punkt).

Gesteinsbruchstücke sind sehr selten im Rochlitz-Ignimbrit und umfassen Grauwacken, Granite und Granulite aus dem cadomischen und variszischen Grundgebirge sowie porphyrische basische bis intermediäre Vulkanite der Kohren-Formation. Sie erreichen Partikelgrößen von bis zu 1 cm.

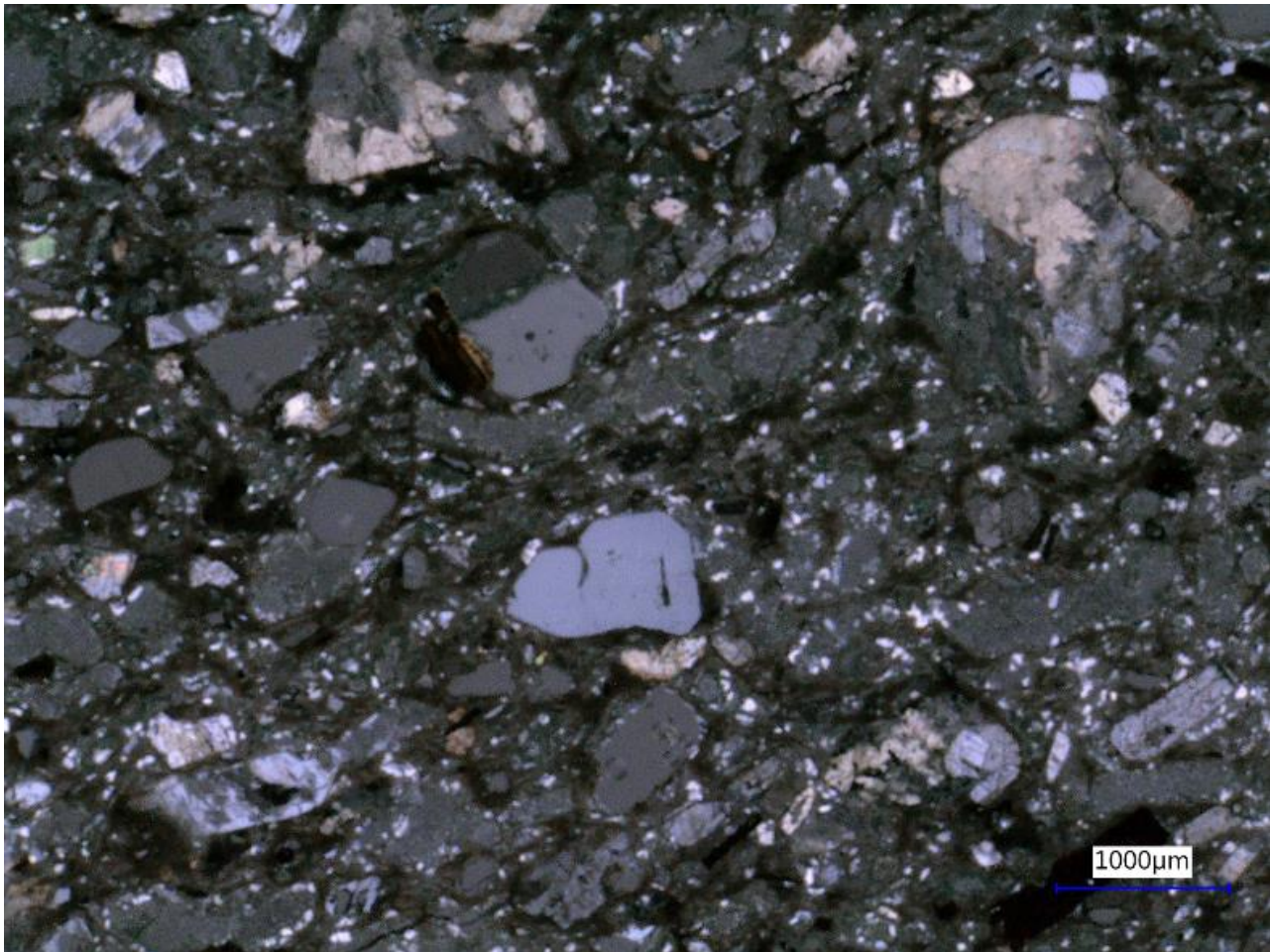


Abbildung 10: Mikroskopische Aufnahme des Rochlitz-β Ignimbrits unter gekreuzten Polarisatoren (Bohrung Ballendorf, Ba1/66 in 184,2 m Teufe).

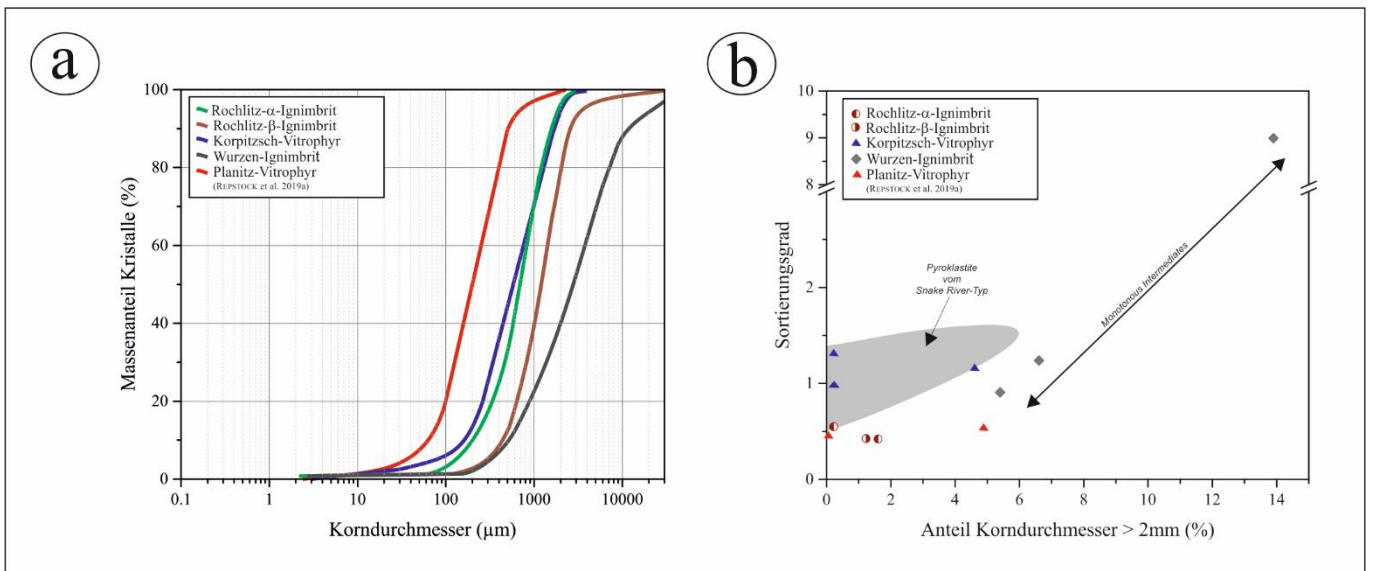


Abbildung 11: a) Durchschnittliche Korngrößenverteilung der Kristalle in verschiedenen pyroklastischen Ablagerungen des Nordsächsischen Vulkanitkomplexes (Rochlitz-, Wurzen-, Korpitzsch-Ignimbrit und Porphyrtuff vom Rochlitzer Berg) und des Chemnitz Beckens (Planitz-Ignimbrit), b) Gegenüberstellung des Sortierungsgrades und den Anteil des Korndurchmessers der Kristallfragmente über 2 mm. Daten für Snake-river-Typ Ignimbrite aus ELLIS et al. (2013).

Tabelle 3: Repräsentative Modalanalysen des Rochlitz-Ignimbrits in Vol.-%. Pseudomorphosen sind hier vernachlässigt. Die älteren Nomenklaturen sind folgenden Literaturen entnommen: EIGENFELD (1978) für den Nordsächsischen Vulkanitkomplex und FISCHER (1991) für das Chemnitz Becken. Modalanalysen des Planitz-Ignimbrits sind REPSTOCK et al. (2019a) entnommen.

Gestein (neue Nomenklatur)	Gestein (ältere Nomenklatur)	Probe	Quarz	Feld- spat	Biotit	Opake Phasen	Gesteins- bruchstücke	Grund- masse
Rochlitz- α	R _I	MH10	7,9	27,7	2,4	3,1	3,9	69,4
Rochlitz- α	R _I	MH15	6,2	20,1	0,6	2,3	0,8	71,5
Rochlitz- α	R _I	MH31	11,4	20,3	0,4	0,9	2,6	64,4
Rochlitz- α	R _{II}	MH56	5,2	28	0,7	2,8	58,9	68,2
Rochlitz- α	R _{II}	MH23	7,0	26,5	0,3	7,3	58,8	74,6
Rochlitz- α	R _{II}	MH32	10,3	24,6	1,2	3,8	56,9	72,1
Rochlitz- β	R _{III}	Ba205.5	7,3	27	0,2	1,0	2,1	62,4
Rochlitz- β	R _{III}	MH54	8,2	26,5	0,9	1,9	3,8	58,7
Rochlitz- β	R _{III}	MH53	11,6	25,8	0,3	1,5	4,0	70,4
Rochlitz- β	R _{III}	MH16	6,3	27,7	1,0	2,3	3,6	53,8
Korpitzsch-V.	K _V	45.11	5,7	22,9	2,9	2,9	5,7	60
Planitz-Ignimbrit	Rochlitz-Ignimbrit	5 Proben	~2	~12		3-4	-	~80

4.2.1.2 Vitrophyr von Korpitzsch

Im Leisniger Porphyrit tritt marginal ein pyroklastisches Gestein mit einer vitrophyrischen Fazies in Erscheinung, in dem Perlitsprünge und Fließgefüge trotz Devitrifizierung (Entglasung) erhalten sind. Sein Vorkommen beschränkt sich auf Lesesteine in der Nähe der Ortschaft Korpitzsch, Aufschlüsse sind derzeit nicht bekannt. Seine stratigraphische Stellung ist bisher nicht geklärt, könnte aber durchaus eine Fazies des Rochlitz-Ignimbrits darstellen (z. B. JENTSCH 1979). Wie für vitrophyrische Pyroklastite charakteristisch, zeichnet sich der Korpitzsch-Vitrophyr durch seinen guten Sortierungsgrad aus (Abbildung 12b; vgl. BRANNEY et al. 2008; ELLIS et al. 2013). Die mehrheitlich kleinen Korngrößen unter 2 mm klassifizieren diesen als Aschentuff (Abbildung 12a). Die Grundmasse besteht zum größten Teil aus Glasscherben dessen Zwischenräume mit Hämatitstaub ausgefüllt sind. Bimsfragmente sind im Vergleich zum vitrophyrischen Planitz-Ignimbrit des Chemnitz Beckens wesentlich häufiger anzutreffen (vgl. FISCHER 1991, REPSTOCK et al. 2019a). Im Einsprenglingsmodalbestand überwiegt Plagioklas gefolgt von Quarz und sporadisch auch Kalifeldspat. Die mafischen Mineralphasen sind überwiegend von Biotit dominiert, während Pyroxen (oder seine Chlorit-Pseudomorphosen) eine seltene Erscheinung darstellt. Glomerophyrische Aggregate treten häufig in Erscheinung, wobei diese lediglich aus Plagioklas und Biotit bestehen.

4.2.2 Nordsachsen: Subvulkanite und Laven

4.2.2.1 Grimmaer und Gattersburger Porphyry

Grimmaer und Gattersburger Porphyry stellen auf der geologischen Karte einen isolierten Gesteinskomplex aus kohärenten Vulkaniten inmitten der ignimbrischen Ablagerungen der Rochlitz und der jüngeren Wurzen Formationen dar (Abbildung 5; z. B. RÖLLIG 1969; ANEGG 1970). Im Hauptverbreitungsgebiet um Grimma ummantelt der Gattersburger Porphyry der Oschatz Formation den zur Rochlitz-Formation gehörenden Grimmaer Porphyry (vgl. HOFFMANN et al. 2013). Ein Vorkommen des Grimmaer Porphyrys im Raum Wernsdorf ist umstritten, da dieser Körper lediglich lithologische und petrographische Ähnlichkeit aufweist, jedoch bisher weder datiert noch geochemisch untersucht wurde.

Der Grimmaer Porphyry folgt, ähnlich wie der Pyroxengranitporphyry der Wurzen-Formation (vgl. REPSTOCK et al. 2018), den NW-SE-verlaufenden Hauptstörungszonen des Nordsächsischen Vulkanitkomplex. Womöglich handelt es sich auch bei dieser subvulkanischen Struktur um einen oder mehrere Porphyrystöcke. Die Grundmasse ist, wie für so ein Gestein typisch, mikrokristallin ausgebildet und lässt ineinander verzahnte Quarz-Feldspat-Vergesellschaftung anmuten. Im frischen Gestein dominiert der Plagioklas in den felsischen Mineralphasen Kalifeldspat und Quarz, während Pyroxen in den mafischen Phasen den Biotit überwiegt (Tabelle 4). Unter dem Polarisationsmikroskop zeigt sich der Pyroxen in einem blau zweiter Ordnung und einer Doppelbrechung von $-0,041$, was auf Ägerinaugit (Na-Ca-Al-Pyroxen) deutet. In den alterierten Gesteinen lassen sich Pseudomorphosen nach Pyroxen schwer erkennen, hier lässt sich ausschließlich Biotit bestimmen.

Die Genese und Gesteinsbestimmung des Gattersburger Porphyrys wird aktuell kontrovers diskutiert. Auf Grundlage seines Vorkommens im Steinbruch Hengstberg wurde dieser als Abfolge rhyolithischer Lavaergüsse interpretiert, welche nach der Ablagerung der Rochlitz-Ignimbrite und der Platznahme der Grimmaer Intrusion erfolgte (RÖLLIG 2010). Er besteht aus einer kristallinen Kernzone, sowie einer vitrophyrischen und einer brekzierten Randfazies. Petrographische Untersuchungen an der Hängebrücke unterhalb der Gattersburg (Grimma) zeigen eine stark kristallisierte Grundmasse mit bis zu 6 mm großen Kristallen, welche ebenso für eine subvulkanische Intrusion sprechen könnten (z. B. GEIßLER & HEIDENFELDER 2016).

Tabelle 4: Repräsentative Modalanalysen im Grimmaer und Gattersburger Porphyry. Mineralpseudomorphosen sind nicht berücksichtigt. Angaben in Vol.-%

Gestein	Probe	Quarz	Feldspat	Biotit	Opake Phasen	Gesteinsbruchstücke	Grundmasse
Grimmaer Porphyry	MH65	6,0	12,0	0	0,9	4,9	76,3
Grimmaer Porphyry	MH64	3,1	15,1	0	2,2	3,1	76,5
Gattersburger Porphyry	MH66	2,2	15,8	1,0	0,6	1,0	79,4
Gattersburger Porphyry	MH67	2,0	12,4	1,4	0,9	0,6	82,7

Jedoch konnten im Rahmen jüngst aufgenommenen vulkanologischen Untersuchungen am Gattersburger Porphyry Bimsscherben im Dünnschliff erkannt werden, weshalb er als Pyroklastit definiert werden muss (HARTMANN 2020). Der Übergang zum Rochlitz-Ignimbrit ist trotz der starken Überprägung durch die angrenzende subvulkanische Intrusion sichtlich fließend. Damit ist der „Gattersburger Porphyry“ als Kontaktaureole des Grimmaer Porphyrys im Rochlitz-Ignimbrit zu interpretieren (HARTMANN 2020). Im Vergleich mit dem Grimmaer Porphyry, zeigt der Einsprenglingsmodus geringere Gehalte an Quarz, jedoch markant hohe Biotitgehalte (>1 Vol.-%). Pseudomorphosen von Pyroxen sind bisher unbekannt.

4.2.2.2 Leisniger Porphyry

Der Leisniger Porphyry erstreckt sich am südlichen Rand des Nordsächsischen Vulkanitkomplex, wird im Norden durch den Rochlitz Ignimbrit begrenzt und im Süden durch andesitische bis trachytische Laven, den Wendishain Ignimbrit und den äußeren Schiefermantel des Sächsischen Granulitmassivs. Zur Genese des Leisniger Porphyrys stellen sich ähnliche Fragestellungen, wie beim Gattersburger Porphyry. Die Bohrung 2729/72 (bei Meinitz) zeigt im Liegenden des lokal 210 m mächtigen Vulkanits Sedimentschichten der Kohren-Formation. Die großflächige Verteilung und die auftretenden Sedimentabfolgen in verschiedenen Bohrungen lassen einen Porphyrystock ausschließen. Daraus ergibt sich die Fragestellung, ob der Leisniger Porphyry einen effusiven Lavadom oder subvulkanischen Lakkolith darstellt (REHDA 2018). Ihm fehlt die sogenannte *Carapace*-Fazies (griech. *χάραξ* [*chárax*] = „Pallisade“, *πάγιος* [*págios*] = „fest“), in der Blöcke aus vulkanischem Material brekziiert vorliegen. Auch in den Bohrungen fehlen Brekzien an den Porphyry-Nebengesteinskontakten. Diese Beobachtung lässt den Schluss zu, dass der Leisniger Porphyry ein Lakkolith ist (REHDA 2018), der vermutlich nach der Ablagerung der Rochlitz-Ignimbrite in den Schichten der Kohren-Formation platzgenommen hat.

Obwohl vulkanische Gefüge (Fließgefüge, Blasenzüge) ersichtlich sind, deutet die rot-bräunliche, violett-graue und grünliche Verfärbung des Gesteins auf starke Alterationen hin (HOHL & WILSDORF 1966). Die Grundmasse ist größtenteils mikrokristallin ausgeprägt und zeigt eine Tonmineralbildung. Innerhalb des Leisniger Porphyrys werden basierend auf petrographischen Beschreibungen vier lithologische Typen unterschieden: 1) *Normal-Typ*, 2) *Biotit-Typ*, 3) *Quarz-Typ* und 4) *Xenolith-führender Typ* (WILSDORF 1963). Der Normaltyp repräsentiert circa 65 % der Gesamtfläche des Intrusivkörpers aus und charakterisiert sich durch die Dominanz von Plagioklas (Tabelle 5), wobei dieser oftmals kaolinisiert vorliegt. Quarz und Biotit treten untergeordnet in Erscheinung. Der Biotit-Typ hat sein Hauptverbreitungsgebiet im südlichen bis südwestlichen Bereich des Leisniger Porphyrys (HOHL & WILSDORF 1966). Aufgeschlossen ist dieser westlich Seifersdorf, im Schanzenbachtal bei Skoplau, sowie im Auenbach- und Wallbachtal (REHDA 2018). Dieser charakterisiert sich, wie der Name vermuten lässt, durch seinen hohen Anteil an Biotit-Einsprenglingen (WILSDORF 1963). Dieser kann durch die Fließgefüge des Magmas deformiert sein. Der Quarz-Typ gilt als Bereich mit der geringsten Alteration und zeichnet sich durch eine kristalline Grundmasse aus, in der Rauchquarz makroskopisch gut erkennbar ist (REHDA 2018). Unter dem Mikroskop zeigt dieser das typische pseudo-hexagonale Gefüge. Vollständig opazitierte Pseudomorphosen nach Pyroxen treten untergeordnet auf und sind nur schwer auszumachen. Im Vergleich zu anderen subvulkanischen Körpern im Nordsächsischen Vulkanitkomplex treten im Leisniger Porphyry glomerophyrische Verwachsungen nur selten auf. Sie bestehen lediglich aus Ab-reichem Plagioklas, Biotit und seltener einer opaken Phase. Der Xenolith-führende Lithofaziestyp weist, wie der Rochlitz-Ignimbrit auch, Fremdgesteinseinschlüsse aus dem Grundgebirge (vorrangig Phyllit, Granulit, Granit), aber auch permokarbone Laven auf (WILSDORF 1963; REHDA 2018).

4.2.3 Chemnitz Becken: Planitz-Ignimbrit

Der Planitz-Ignimbrit ist das 10 bis 30 m mächtige Produkt einer mehrphasigen Eruption, dessen Ursprung im Nordsächsischen Vulkanitkomplex vermutet wird (FISCHER 1991). Diese pyroklastischen Ablagerungen finden sich im gesamten Chemnitz Becken und bilden das Top der durch vulkanische Einschaltung dominierten Planitz-Formation (FISCHER 1991; SCHNEIDER et al. 2012). Lediglich im westlichen Chemnitz Becken wird dieser pyroklastische Leithorizont durch basische und intermediäre Vulkanite unterbrochen, die topographische Barrieren für die Ablagerung des Ignimbrit darstellen (FISCHER 1991). Der Aufbau dieser kristallarmen pyroklastischen Ablagerung (>20 Vol.-% Kristallgehalt) mit einer basalen vitrophyrischen und einer zentralen massiv-lithoidalen Fazies erinnert an die känozoischen Ignimbrite der *Snake River Plain* der westlichen USA (vgl. BRANNEY et al. 2008; REPSTOCK et al. 2019a).

Tabelle 5: Repräsentative Modalanalysen des Leisniger Porphyrs (aus REHDA 2018). Xenolithvorkommen sind nicht berücksichtigt (Angaben in Vol.-%).

Gestein	Lithofaziestyp	Probe	Quarz	Feldspat	Biotit	Grundmasse
Leisniger Porphyr	Normal-Typ	45.62	2	15	3	80
Leisniger Porphyr	Normal-Typ	45.67	2	19	2	77
Leisniger Porphyr	Normal-Typ	45.68	2	14	2	83
Leisniger Porphyr	Quarz-Typ	Bs1-1	1,7	15,3	5,2	77,9
Leisniger Porphyr	Quarz-Typ	Bs1-5	1,4	10,0	5,7	82,7
Leisniger Porphyr	Quarz-Typ	Hs1	3,4	8,2	4,7	83,6
Leisniger Porphyr	Biotit-Typ	Ba205.5	7,3	27	0,2	62,4
Leisniger Porphyr	Biotit-Typ	MH54	8,2	26,5	0,9	58,7
Leisniger Porphyr	Biotit-Typ	MH53	11,6	25,8	0,3	70,4

Der basale grauschwarze Vitrophyr ist als gut sortierter Aschentuff einzuordnen (95 Vol.-% der Kristalle unter 2 mm; REPSTOCK et al. 2019a; Abbildung 12a, b), in dessen Grundmasse (ca. 80 Vol.-%) transparente und untergeordnet bräunliche Glasscherben auftreten (FISCHER 1991). Die rasche Abkühlung und die damit verbundene Volumenabnahme des vulkanischen Glases und eine leichte Hydratisierung unter niedrigrigen Temperaturen lassen Perlitstrünge entstehen (DAVIS & MCPHIE 1996), welche im frischen Gestein häufig unter dem Mikroskop zu beobachten sind (REPSTOCK et al. 2019a). Vermutlich führten hydrothermale Alteration oder Diagenese zur Umwandlung des rhyolithischen Glases und zu den Tonmineralen Illit und Smektit (SCHÄFER 2019). Hierbei wird Wasserstoff zu Lasten von Natrium und Kalium angereichert. Bimslapilli sind relativ selten, aber durch ihr langgestrecktes Parallelgefüge deutlich erkennbar (REPSTOCK et al. 2019a; SCHÄFER 2019). Der Verschweißungsgrad der Bimslapilli nimmt von der Basis zum Top ab (FISCHER 1991), zeichnet aber im basalen Vitrophyr oft das Fluidalgefüge des Ignimbrits nach (REPSTOCK et al. 2019a).

Im Einsprenglingsmodalbestand der felsischen Mineralphasen dominiert Ab-reicher Plagioklas (~7 Vol.-%) vor Sanidin (5 bis 6 Vol.-%) und Quarz (~2 Vol.-%), während die ferromagnesischen Silikate von Pyroxen dominiert werden (3 bis 4 Vol.-%). Idiomorph bis hypidiomorph gewachsener Quarz tritt in pseudohexagonaler Gestalt auf und zeigt die typischen Einbuchtungen, welche durch Resorption (DONALDSON & HENDERSON 1988) oder Umwachsen eines bereits weggelösten Kristalls entstehen können (KOZŁOWSKI 1981). Resorptionstexturen entstehen, wenn es Fluktuationen in der chemischen Zusammensetzung der Magmenkammer gibt. Resorptionen sind auch in Plagioklas und Pyroxen beobachtet worden (feine Siebtexturen, periphere Oberflächenresorption). Granophyrische Verwachsungen oder Myrmekite, wie sie im Rochlitz-Ignimbrit beschrieben sind (EIGENFELD 1978), wurden bisher nicht im Planitz-Ignimbrit beschrieben (vgl. FISCHER 1991; REPSTOCK et al. 2019a). In glomerophyrischen Verwachsungen zwischen Pyroxen und Plagioklas ist der Plagioklas stets Anorthit-reich (REPSTOCK et al. 2019a). Biotit tritt untergeordnet in Erscheinung, jedoch konnten zwei unterschiedliche Typen dieses Minerals identifiziert werden. Zum einen tritt anhedraler Biotit mit einem ausgeprägten Reaktionssaum auf und zum anderen tritt Biotit idiomorph in Erscheinung. Letzterer tritt auch in glomerophyrischen Verwachsungen mit Ab-reichem Plagioklas, Ti-reichem Oxid Ilmenit und Zirkoneinschlüssen auf. Idiomorph ausgeprägter Biotit zeichnet oftmals die rheomorphe

Deformation nach (BECK 2018), welche ein typisches Charakteristikum der *Snake River-Typ* Ignimbrite darstellt (BRANNEY et al. 2008).

4.3 Geochemische Zusammensetzung

4.3.1 Klassifikation der Vulkanite

Ein Schwerpunkt dieser Arbeit ist die geochemische Untersuchung der spätpaläozoischen Vulkanite der Rochlitz-Caldera im Nordsächsischen Vulkanitkomplex. Sie wird benötigt, um die Gesteine nach den international gültigen Klassifikationen zu charakterisieren. Auf den Klassifikationsdiagrammen für Vulkanite (nach LE BAS et al. 1986) und Plutonite (nach Cox et al. 1979), in denen die Alkalimetalle (Na_2O und K_2O) gegen SiO_2 aufgetragen werden, lassen sich die magmatischen Gesteine des Nordsächsischen Vulkanitkomplex bestimmen (Abbildungen 13a, b). Die Pyroklastite des Rochlitzer Vulkansystems lassen sich so in den ausschließlich rhyolithischen Rochlitz- α -Ignimbrit und die trachydazitischen bis rhyolithischen Rochlitz- β - und Rochlitz-N-Ignimbrite unterscheiden. Unter den jüngeren Pyroklastiten des Nordsächsischen Vulkanitkomplexes können der Dornreichenbacher Ignimbrit als ausschließlich SiO_2 -reiches rhyolithisches und der Wurzener Ignimbrit als trachydazitisch bis rhyolithisches Gestein klassifiziert werden (Abbildungen 13a, b, Repstock et al. 2018). Der von FISCHER (1991) zum Rochlitzer Vulkansystem gezählte Planitz-Ignimbrit im Chemnitz Becken zeigt eine ausschließlich rhyolithische Zusammensetzung mit geringen Schwankungen im SiO_2 -Gehalt, bei relativ ausgeglichenen $\text{Na}_2\text{O}:\text{K}_2\text{O}$ -Verhältnissen (vgl. REPSTOCK et al. 2019a).

Alle magmatischen Gesteine im Nordsächsischen Vulkanitkomplex weisen ein $\text{K}_2\text{O} > \text{Na}_2\text{O}$ -Verhältnis auf, was möglicherweise mit einer metasomatischen Beanspruchung oder einer Alteration in Verbindung gebracht werden kann (vgl. Kapitel 4.2.2). Auch der relativ hohe Glühverlust in der Mehrzahl der analysierten Proben (<10,7 wt.-%), der bei der Herstellung der Schmelztabletten entsteht, deutet auf eine solche Beanspruchung des Gesteins hin. Dies könnte in Zusammenhang mit den großen subvulkanischen Intrusionen im Nordsächsischen Vulkanitkomplex stehen, aber auch mit einer späteren supergenen Verwitterung. Die holokristallinen und porphyrischen Intrusionen klassifizieren den Leisniger und den Grimmaer Porphyry als Mikrogranit und den Wurzener Porphyry als Mikrosyenit, Mikroquarzdiortit und als Mikrogranit (Abbildung 13b).

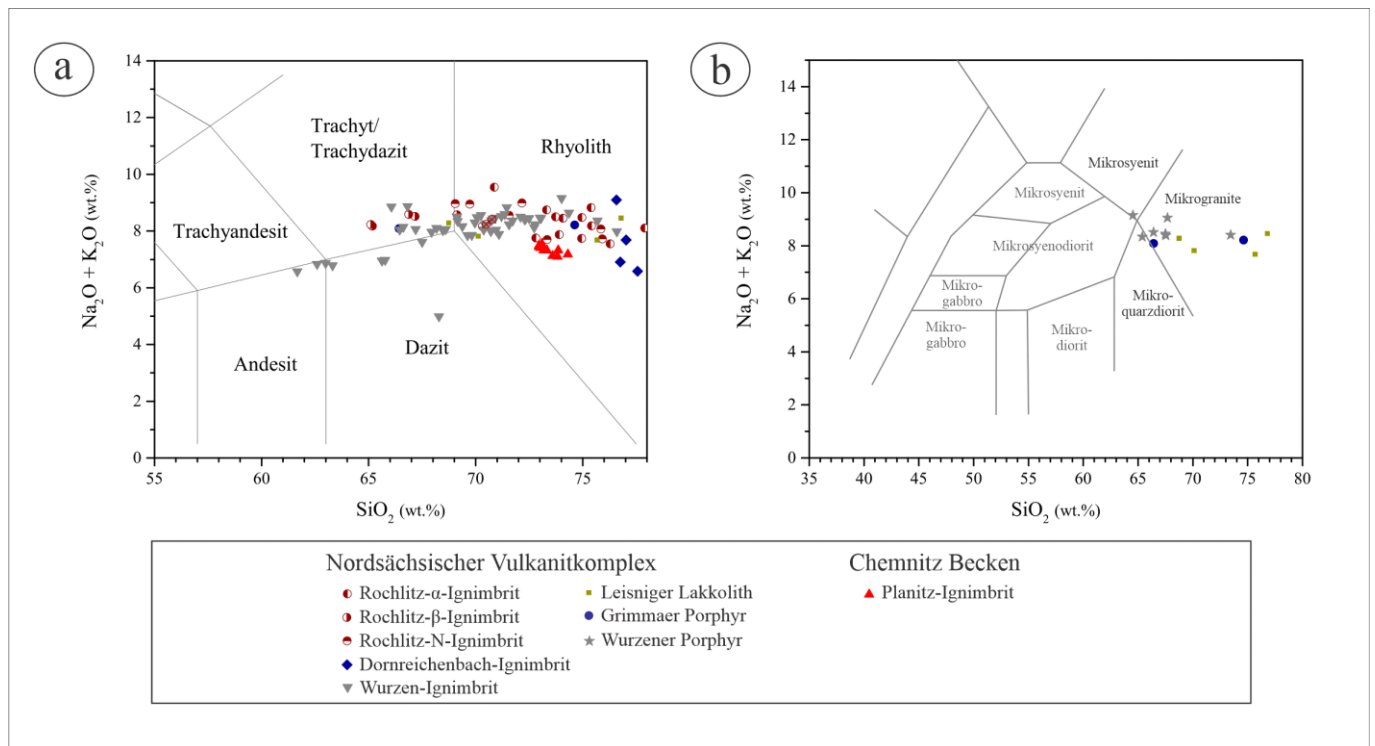


Abbildung 12: TAS („Total Alkali versus Silica“) - Diagramme zur Klassifikation von a) Vulkaniten (nach LE BAS et al. 1986) und b) Subvulkaniten (Ganggesteine, nach Cox et al. 1979) im Nordsächsischen Vulkanitkomplex. Daten für den Wurzen-Ignimbrit und den Wurzener Porphyr entnommen aus REPSTOCK et al. (2018) und für den Panitz Ignimbrit entnommen aus REPSTOCK et al. (2019a).

Die Verwendung immobiler Spurenelemente lässt eine Bestimmung trotz möglicher Alteration zu (z. B. WINCHESTER & FLOYD 1977; PEARCE 1996). Wie der Name bereits verlauten lässt, können immobile Spurenelemente nicht leicht von zirkulierenden Fluiden, wie hydrothermalen Wässern abgeführt werden. Dies liegt im Ionenpotential des Kations – also der Dichte der elektrischen Ladung und der Größe des Ionenradius - begründet. So können die sogenannten *large ion lithophile elements* (LILE, dt.: Großionige lithophile Elemente) leichter aus dem Gestein herausgelöst werden, als jene der *high field strength elements* (HFSE, dt.: Elemente mit hoher Feldstärke). Zur Gesteinsbestimmung werden hierbei Zirkonium (Zr), Titan (Ti), Niob (Nb) und Yttrium (Y) als Maß der Magmendifferentiation und der fraktionierten Kristallisation herangezogen (vgl. PEARCE 1996). Für die Rochlitz-Ignimbrite bestätigen sich die dazitischen und rhyolithischen Zusammensetzungen, lediglich der Rochlitz- β zeigt auch trachytische Zusammensetzungen, welche einen ursprünglich alkalischen Charakter andeutet und durch die oben genannten Vorgänge verändert wurden (Abbildung 14). Eine Analyse des Rochlitz- β -Ignimbrits zeigt eine andesitische Zusammensetzung, was womöglich ein Hinweis auf weniger differenzierte Schmelze in einem komplexen Rochlitzer Magmensystem sein könnte. Ähnliche Beobachtungen konnten für den Wurzen- und den Planitz-Ignimbrit gemacht werden (REPSTOCK et al. 2018; 2019a), in denen von unten zugefügte basaltische bis (trachy-) andesitische Magmen das Magmensystem periodisch befeuern und aufheizen.

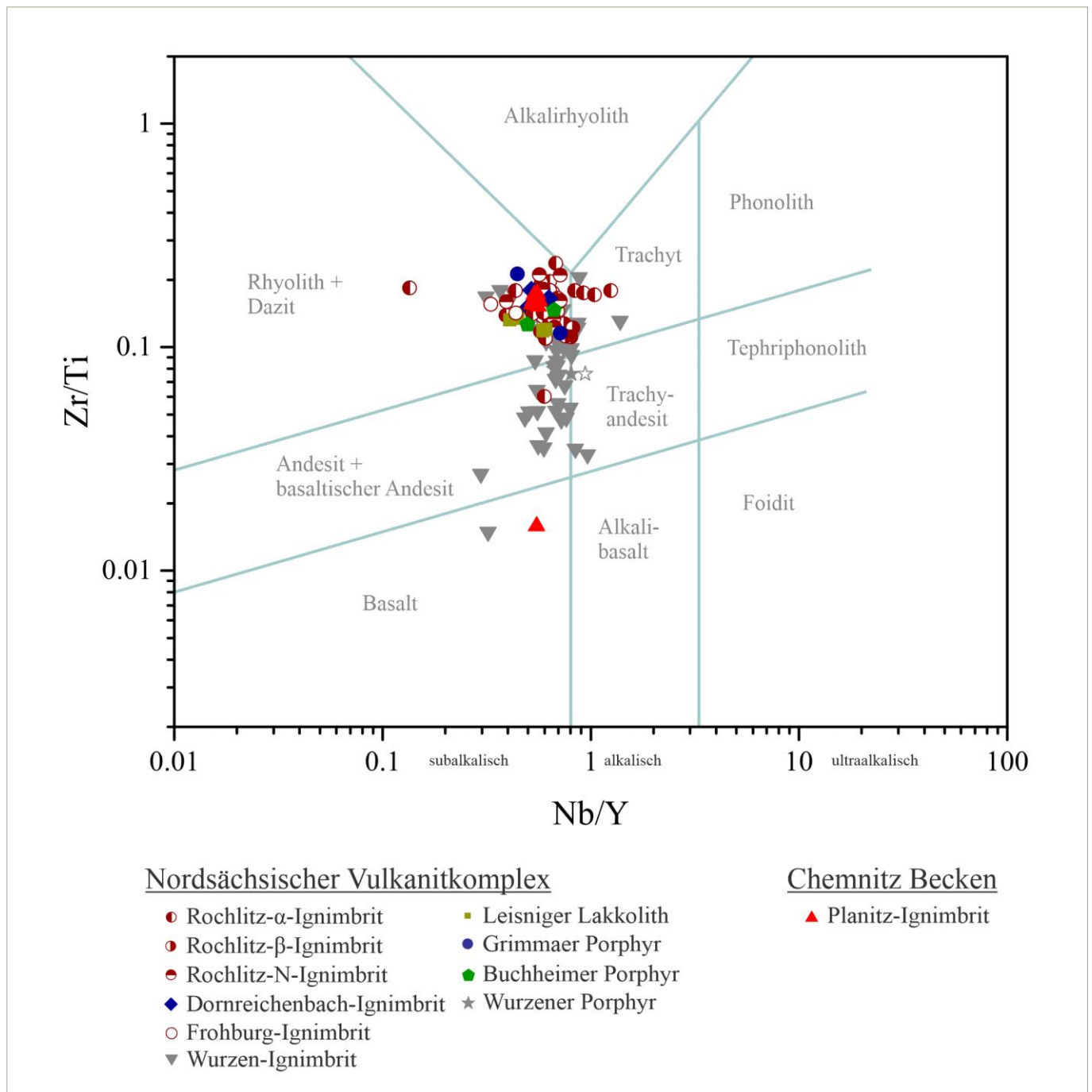


Abbildung 13: Klassifikationsdiagramm nach PEARCE (1996) in denen Verhältnisse der immobilen Spurenelemente (Zr/Ti und Nb/Y) gegeneinander aufgetragen sind. Die Daten für den Wurzen-Ignimbrit und dessen subvulkanischen Porphyry sind aus REPSTOCK et al. (2018) entnommen, für den Planitz-Ignimbrit aus REPSTOCK et al. (2019a).

Spurenelemente in den Gesteinen können aber auch Hinweise auf die Prozesse in der Erdkruste und die Entwicklung des Magmensystems geben. Eine Möglichkeit die Anreicherung oder Abreicherung eines Elementes gegenüber einem bestimmten Durchschnittsgestein zu verdeutlichen, bieten die sogenannten Spurenelementvariationsdiagramme. Beim Aufstieg der aus dem Mantel aufsteigenden primitiven Magmen werden diese differenziert und nehmen Elemente der Erdkruste auf. Andererseits werden durch die fraktionierte Kristallisation der Minerale auch Elemente der aufsteigenden Schmelze entzogen.

Vergleicht man die analysierten Proben mit einer primitiven Mantelschmelze, so werden ausgeprägte negative Anomalien bei den Elementen Niob (Nb), Tantal (Ta), Strontium (Sr) und Titan (Ti) deutlich sichtbar (Abbildung 15). Obwohl solche Nb- und Ta-Anomalien typischerweise Subduktionszonensignaturen darstellen, sind sie im Intraplattenvulkanismus eher als eine Kontamination durch Krustensegmente zu interpretieren (z. B. ROMER et al. 2001; ZEGERS & VAN KEKEN 2001). Der Vergleich der Konzentrationen der immobilen Spurenelemente Nb und Ta in den analysierten Vulkaniten mit jenen der unteren (Nb ~ 6 ppm, Ta < 1 ppm, TAYLOR & MCLENNAN 1995) und oberen durchschnittlichen Erdkruste (Nb ~ 25 ppm, Ta ~ 11 ppm, TAYLOR & MCLENNAN 1985) kann relative Hinweise auf Teufen von Magmenkammern geben. Die Streuung der Nb-Konzentration im Rochlitz- α - (Nb = 9.5 bis 24.6 ppm) und im Wurzen-Ignimbrit (Nb = 9,3 bis 25,3 ppm, vgl. REPSTOCK et al. 2018) deutet auf mehrstufige Magmensysteme in Bereichen von tiefen bis flachen Krustensegmenten hin, welche typisch für Supervulkane mit langlebigen komplexen Magmensystemen sind. Andere Pyroklastite, wie der Rochlitz- β -Ignimbrit (Nb = 21,1 bis 23,5 ppm) und der Planitz-Ignimbrit im Chemnitz Becken (23 bis 25,7 ppm, vgl. REPSTOCK et al. 2019a) zeigen Nb-Konzentrationen, die eine Magmenkammer in der oberen Kruste andeuten. Die Ta-Gehalte sind in allen permischen Vulkaniten Nordsachsens unterhalb von 2 ppm, was einer mittleren Zusammensetzung der unteren Kruste entspricht. Das Spurenelement Strontium (Sr) wird bevorzugt in Feldspat eingebaut, welcher unter Alteration schnell in Mitleidenschaft gezogen wird (siehe Kapitel 4.2.2). Dies erklärt die besonders ausgeprägten negativen Sr-Anomalien in den Rochlitz-Ignimbriten (Abbildung 15). Die markant negative Titanium-Anomalie ist durch die Kristallisation von Ilmenit (FeTiO_3) und Titanomagnetit (Fe_2TiO_4) zu erklären. Diese Minerale sind Bestandteil der glomerophyrischen Aggregate, welche als frühe Kristallite (Kumulate) aus einer weniger differenzierten Schmelze interpretiert werden können.

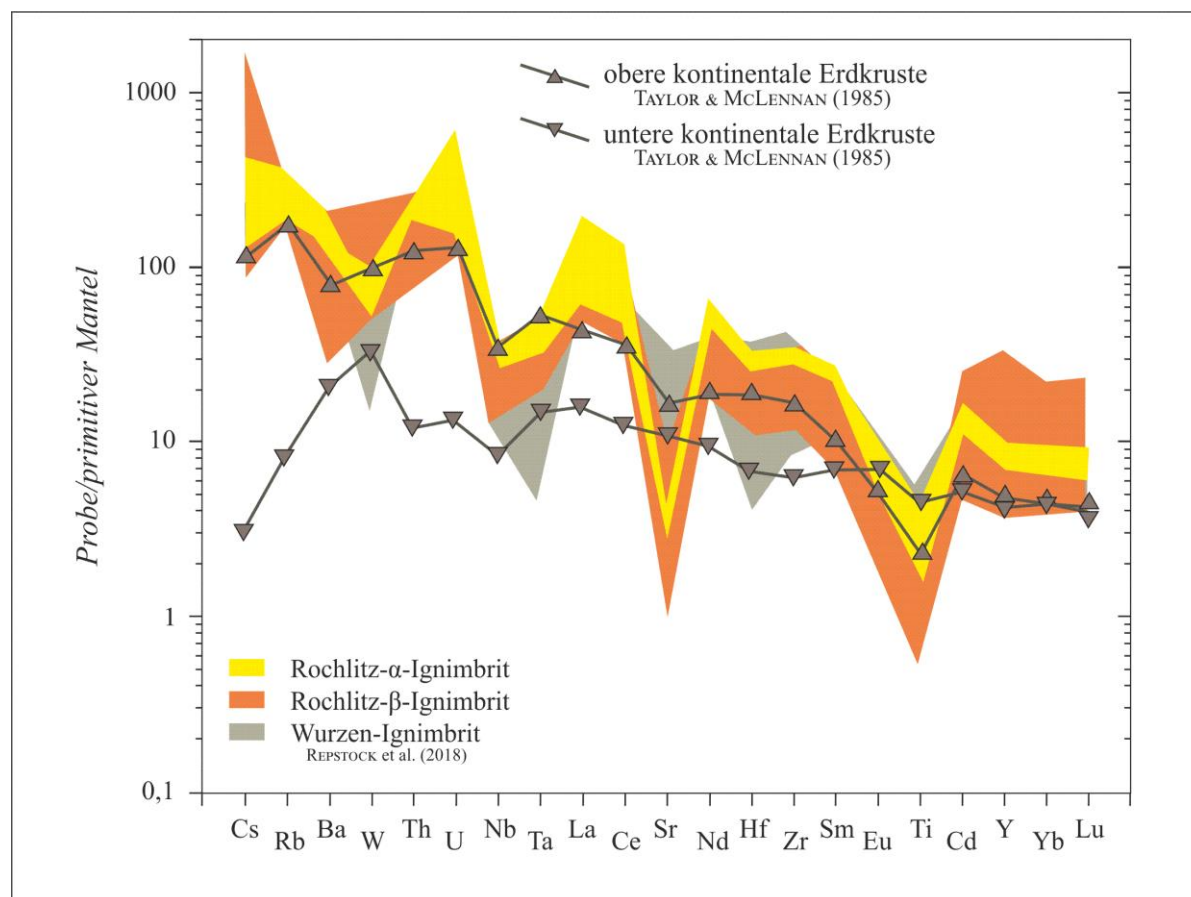
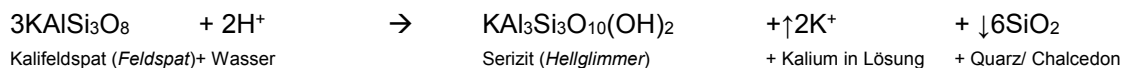
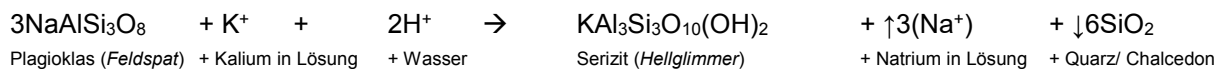


Abbildung 14: Spurenelementvariationsdiagramm der Rochlitz- und Wurzen-Ignimbrite im Nordsächsischen Vulkanitkomplex normalisiert auf den primitiven Mantel (nach Sun & McDonough 1985). Die mittlere Zusammensetzung der unteren und oberen Erdkruste (aus TAYLOR & MCLENNAN 1985) wurde zum Vergleich ebenfalls auf den primitiven Mantel normalisiert.

4.3.2 Alteration

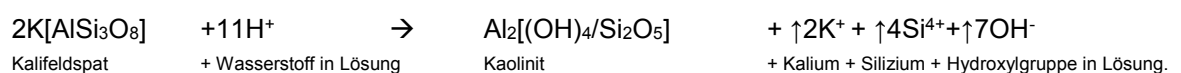
Die Alteration bezeichnet die mineralogische und chemische Umwandlung eines Gesteines. Diese durch erhitzte Fluide hervorgerufenen Prozesse tragen maßgeblich zum Aussehen des Gesteins bei. Das Vulkanite im Rochlitz Vulkansystem solchen Prozessen ausgesetzt waren ist bereits makroskopisch erkennbar. Gerade die charakteristischen ziegelroten bis gelblichen Bänder, welche den Rochlitzer Porphyr als Werkstein und Zierstein so ansehnlich machen, deuten auf Alteration hin. Die Gesamtgesteinszusammensetzungen (siehe Kapitel 4.2) zeigen, dass einige der untersuchten Proben überhöhte SiO₂-Gehalte haben (Dornreichenbacher und Leisniger Porphyr, Rochlitz-α- und Rochlitz-N-Ignimbrit; Abbildung 13). Diese heutige chemische Zusammensetzung verrät viel über solche Prozesse, die bereits während oder kurz nach der Eruption stattfinden können (z. B. DE GENNARRO et al. 1999; LARGE et al. 2001; GIFKINS et al. 2005; POLA et al. 2012).

Das Diagramm nach LARGE et al. (2001) ist eine veranschaulichende Darstellung der Alterationsprozesse (Abbildung 16). In diesem werden der Alterationsindex nach ISHIKAWA et al. (1976) und der Chlorit-Carbonat-Pyrit-Index gegeneinander aufgetragen. Daraus lässt sich ableiten, dass der Rochlitz-Ignimbrit stark von einer kaliumbetonten Metasomatose beeinflusst ist. Dieser Effekt kann durch aggressive Restfluide und den Wärmefluss der subvulkanischen Körper (Grimmaer und Leisniger Lakkolith) ausgelöst werden (ähnlich wie bei den Porphyry-Lagerstätten, z. B. SILLITOE 2000), könnte aber auch während der mesozoisch-känozoischen Verwitterung stattgefunden haben (WALTER 1991; GILG et al. 2003). In jedem Fall bedeutet dies, dass eine wässrige fluide Phase gewirkt haben muss, die den An- und Abtransport der chemischen Komponenten ermöglichte und durch Lösung und Fällungsreaktionen die Bildung neuer Mineralphasen hervorrief. Ausgelöst durch - auf das Gestein aggressiv wirkende - hydrothermale Wässer kommt es dabei zu einer Mineralumwandlung des Feldspates in Serizit und zu einer Ausfällung einer SiO₂-Phase (Quarz/ Chalcedon):



Die Ausfällung der SiO₂-Phase führt zu einer starken Beeinflussung des Gesamtgesteinsgeochemismus (Abbildung 16). Dementsprechend ist davon auszugehen, dass die ursprüngliche Zusammensetzung des rhyolithischen Rochlitz-α-Ignimbrits SiO₂-ärmer war. Ob es auch ursprünglich eine trachydazitische oder trachytische Zusammensetzung in diesem gab darf in diesem Zusammenhang nur spekuliert werden (siehe auch Kapitel 4.2.1). Eine andere Frage, die sich aus diesen Erkenntnissen ergibt, ist warum der Wurzener Ignimbrit von dieser K-betonten Metasomatose nicht beeinträchtigt wurde. Eine mögliche Erklärung könnte in den klimatischen Begebenheiten während der jeweiligen Eruption liegen. Während der Rochlitzer Supervulkaneruption könnte es humider als während der Wurzener Supereruption gewesen sein. Im Rotliegend des südlich angrenzenden Chemnitz Becken konnte ein Klimatrend von semihumiden zu ariden Bedingungen anhand der Fossilführung beobachtet werden (SCHNEIDER & ROMER 2010).

Ein weiterer Einfluss auf die Zusammensetzung des Gesteins hatte die mesozoisch-känozoische Verwitterung, welche durch die großflächige Bildung des Minerals Kaolinit (Al₂[(OH)₄/Si₂O₅]) die großen Kaolinvorkommen Sachsens schuf. Zirkulierende meteorische Wässer lösten die Alkalimetalle (K⁺ und Na⁺) aus dem Feldspatgitter und es kommt zum Einbau der Hydroxylgruppe (OH⁻):



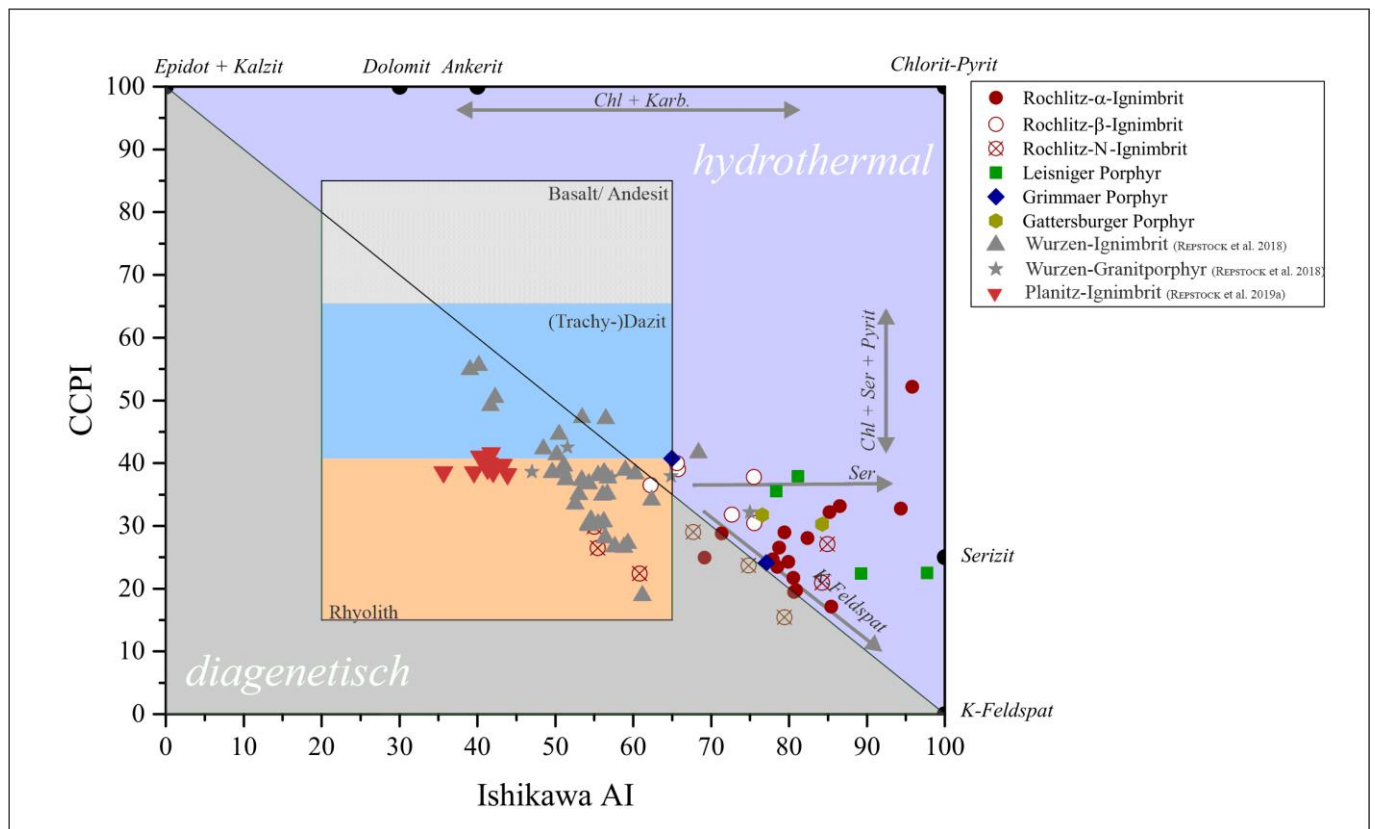


Abbildung 15: Alterationsdiagramm in dem der Chlorit-Carbonat-Pyrit-Index (CCPI) nach LARGE et al. (2001) gegen den Alterationsindex (AI) nach ISHIKAWA et al. (1976) gegeneinander aufgetragen sind (modifiziert nach LARGE et al. 2001). Deutlich erkennbar ist die K-betonte Metasomatose bzw. Alteration der Gesteine im Rochlitzer Vulkansystem.

4.4 Mineralchemie

Die chemische Zusammensetzung gesteinsbildender Minerale gibt uns Aufschluss über das Wachstum des Kristalls, die Herkunft der Magmen und die Genese des Gesteins. Anders als in den Vulkaniten der Wurzen-Caldera (REPSTOCK et al. 2016) und dem Planitz-Ignimbrit des Chemnitz Beckens (FISCHER 1991; REPSTOCK et al. 2019a) sind mineralchemische Untersuchungen im Rochlitzer Vulkansystem wegen der starken Alteration nur eingeschränkt möglich (vgl. Kapitel 4.2.2). Die Untersuchungen konzentrieren sich somit auf die gesteinsbildenden Minerale Feldspat und Biotit.

Feldspat ist eine häufig in der Erdkruste vorkommende Mineralgruppe der Silikate, welche zwei Mischkristallreihen unterscheidet: 1- *Alkalifeldspat*- und 2 – *Plagioklas*-Mischkristallreihe. Alkalifeldspat stellt – wie der Name bereits andeutet - eine Mischkristallreihe zwischen dem Kalium- (KAlSi_3O_8 – Orthoklas) und Natrium-Endglied ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ -Albit) dar. Albit bildet gleichzeitig das Na-Endglied der Plagioklas-Mischkristallreihe, in der das Alkalimetall Na durch das Erdalkalimetall Ca diadoch austauschbar ist. Da das Alkalimetall Na^+ eine andere Ionenladung und einen anderen Ionenradius besitzt, muss der Einbau des Ca^{2+} durch ein Aluminiumion zu Lasten eines Siliziumions kompensiert werden (gekoppelte Substitution), weshalb sich eine Formel von $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ für das Ca-Endglied Anorthit ergibt. Die chemische Zusammensetzung des Feldspats wird in den Molanteilen der Endglieder dargestellt. Alkalifeldspat tritt im Rochlitzer Vulkansystem stets Kalium-betont auf, wobei kleinere Unterschiede im K : Na-Verhältnis in den einzelnen Rochlitz-Ignimbriten festzustellen sind (Abbildung 17). So hat der dominierende Alkalifeldspat Sanidin im Rochlitz- α -Ignimbrit eine Zusammensetzung von $\text{Or}_{64}\text{Ab}_{35}\text{An}_1$ bis $\text{Or}_{67}\text{Ab}_{32}\text{An}_1$, während der

Sanidin im Rochlitz- β -Ignimbrit eine größere K-Betonung aufweist ($Or_{67}Ab_{29}An_4$ bis $Or_{72}Ab_{26}An_2$). Im Rochlitz-N-Ignimbrit kann eine Mischkristallreihe zwischen Orthoklas ($Or_{91,0}Ab_{8,5}An_{0,5}$) und Sanidin ($Or_{76,0}Ab_{23,5}An_{0,5}$) dokumentiert werden. Zusammensetzungen des Anorthoklas (Albit-reicher Alkalifeldspat) konnten als Entmischungen in Albitkristallen des Rochlitz-N beobachtet werden ($Or_{23}Ab_{71}An_6$ und $Or_{16}Ab_{75}An_4$; Abbildung 17). Im Rochlitzer Vulkansystem konnte Plagioklas lediglich im Rochlitz-N-Ignimbrit gemessen werden. Hierbei handelt es sich um Mischkristalle von Andesin ($Or_{5,5}Ab_{65,5}An_{29,0}$) über Oligoklas ($Or_{8,5}Ab_{73,0}An_{18,5}$) bis Albit ($Or_{6,0}Ab_{90,5}An_{3,5}$). Der jüngere Wermsdorf-Ignimbrit zeigt ausschließlich Hoch-Temperatur-Orthoklas mit einer Zusammensetzung von $Or_{95,5}Ab_{4,0}An_{0,5}$ bis $Or_{98}Ab_2An_0$ (Abbildung 17). Hier konnte nur extrem Na-reicher Plagioklas (Albit) dokumentiert werden ($Or_{0,6}Ab_{99}An_{0,4}$ bis $Or_8Ab_{88}An_4$). In den höchstens geringfügig alterierten Vulkaniten des Wurzen Ignimbrits (REPSTOCK et al. 2016) oder des Planitz-Ignimbrits im Chemnitz Becken (REPSTOCK et al. 2019a) konnten wesentlich höhere Anorthit-Gehalte im Plagioklas dokumentiert werden, was womöglich auch in der ursprünglichen Zusammensetzung im serizitisierten oder kaolinisierten Feldspat der Rochlitz-Ignimbrite zu erwarten, aber chemisch nicht mehr nachzuvollziehen ist.

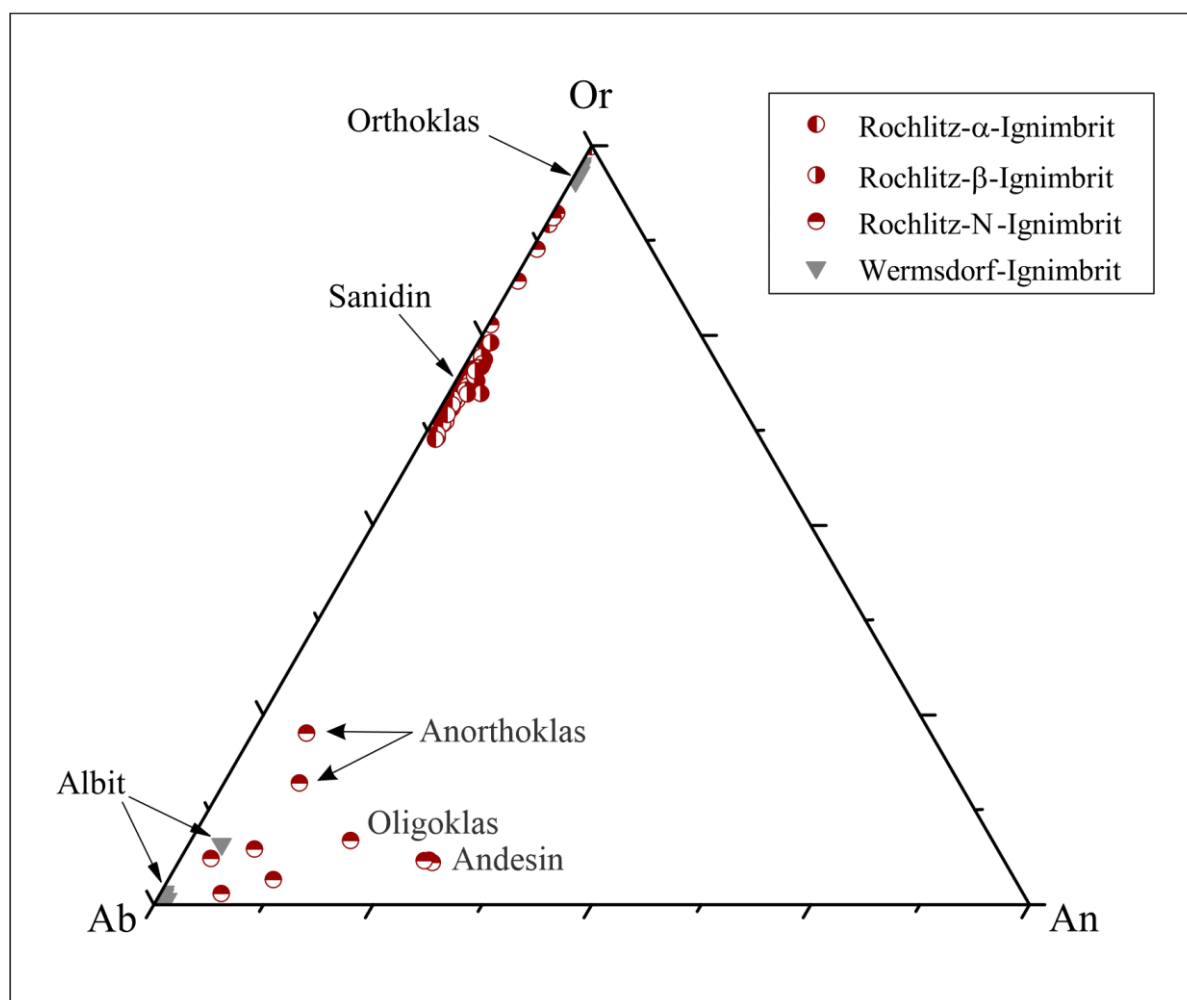


Abbildung 16: Klassifikationsdiagramm im ternären Orthoklas (Or)– Albit (Ab)– Anorthit (An)-System zur Feldspatbestimmung. Im Rochlitzer Vulkansystem ist Alkalifeldspat Kalium-betont (Sanidin + Orthoklas), nur im Rochlitz-N-Ignimbrit konnte Natrium-betonten Alkalifeldspat (Anorthoklas) dokumentiert werden. Die Plagioklas-Mischkristallreihe tritt stets Na-betont auf (Albit, Oligoklas, Andesin). Jedoch liegt Plagioklas größtenteils alteriert vor (siehe Kapitel 4.2.2), sodass ursprünglich vorhandene Ca-reiche (oder auch An-reiche) Plagioklase nicht ausgeschlossen werden können.

Biotit ist eine Mineralgruppe der Phyllosilikate (oder auch Schichtsilikate genannt), die eine Mischkristallreihe zwischen den Mineralen Annit ($\text{KFe}_3^{2+}\text{AlSi}_3\text{O}_{10}(\text{F,Cl,OH})_2$), Siderophyllit ($\text{KFe}^{2+}2\text{Al}(\text{Al}_2\text{Si}_2)\text{O}_{10}(\text{F,Cl,OH})_2$), Eastonit ($\text{KAlMg}_2(\text{Si}_2\text{Al}_2)\text{O}_{10}(\text{F,Cl,OH})_2$) und Phlogopit ($\text{KMg}_3\text{AlSi}_3\text{O}_{10}(\text{F,Cl,OH})_2$) bilden. Die chemischen Formeln dieser Endglieder deuten auf komplexe Substitutionsmechanismen im Kristallgitter des Biotits hin. So werden Silizium (Si) und Aluminium (Al) auf der Tetraederposition diadoch ausgetauscht. Auf der Oktaederposition, die zwischen zwei Tetraederschichten liegt, wird vor allem Magnesium (Mg^{2+}) und Eisen (Fe^{2+}), aber auch Aluminium (Al^{2+}) diadoch ausgetauscht. Die Zwischenlagen, welche Pakete aus je zwei Oktaeder- und einer Tetraederschicht voneinander trennen, sind in dem Kristallgitter für das Kalium (K^+) reserviert (Abbildung 18). Wie bei anderen ferromagnesischen Silikaten (z. B. Amphibol, RIDOLFI et al. 2010; Pyroxen, LE BAS 1962; LETERRIER et al. 1982) eignet sich Biotit im besonderen Maße magmatische Systeme zu rekonstruieren (z. B. GUO & GREEN 1990; ABDEL-RAHMAN 1994; RIGHTER et al. 2002).

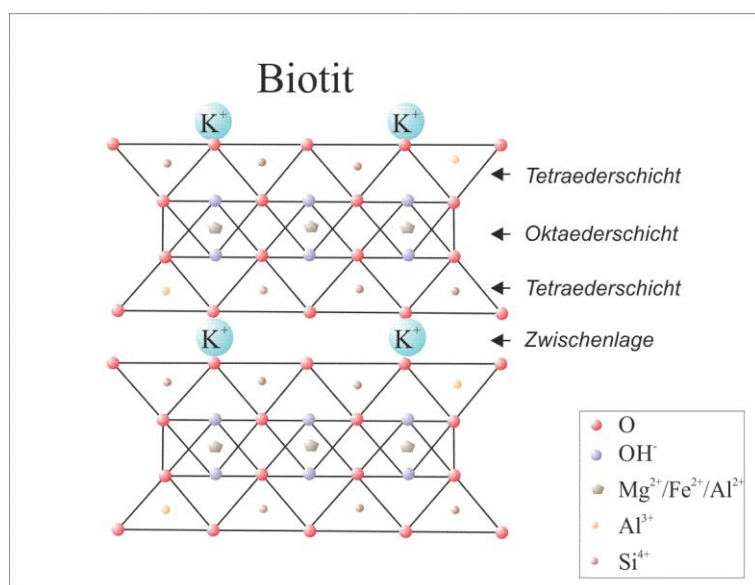


Abbildung 17: Schematischer Bauplan des Kristallgitters der Biotitgruppe.

Die chemische Zusammensetzung zeigt verschiedene Biotitgruppenminerale im Rochlitzer Vulkansystem. So sind im Rochlitz- α -Ignimbrit ausschließlich eisenreiche Siderophyllite zu erkennen, während der Biotit des Rochlitz- β -Ignimbrits ein Mg-reicher Siderophyllit und ein Mg-reicher Annit ist (Abbildung 19a). Der Chemismus des Biotits im Rochlitz-N-Ignimbrit und im Planitz-Ignimbrit zeigt die Zusammensetzung eines Fe-reichen Annits und seltener eines Siderophyllits. Die relativ weite Streuung des Mg : Fe-Verhältnisses in den Rochlitz- α und - β -Ignimbriten deutet auf eine hauptsächliche Substitution auf der Oktaederposition, während im Biotit des Rochlitz-N- und des Planitz-Ignimbrits ein bevorzugter Austausch zwischen Si und Al^{IV} auf der Tetraederposition stattfand (Abbildung 19a). Nach HILDRETH & MAHOOD (1985), deutet dies auf unterschiedliche magmengenetische Prozesse hin. Dies hätte zur Folge, dass der Rochlitz-N-Ignimbrit – wie der Planitz-Ignimbrit im Chemnitz Becken - als eigenständiger Ignimbrit anzusehen ist. Ein Zusammenhang mit eventuellen Alterationen kann ausgeschlossen werden, da alle analysierten Kristalle im ternären $10^*\text{TiO}_2\text{-MgO-FeO}$ -System (NACHIT et al. 2005) im Feld des primärmagmatischen Biotits plotten (Abbildung 19b). Dieser „frische“ Zustand prädestiniert den Biotit für weitere Untersuchungen hinsichtlich seiner Genese.

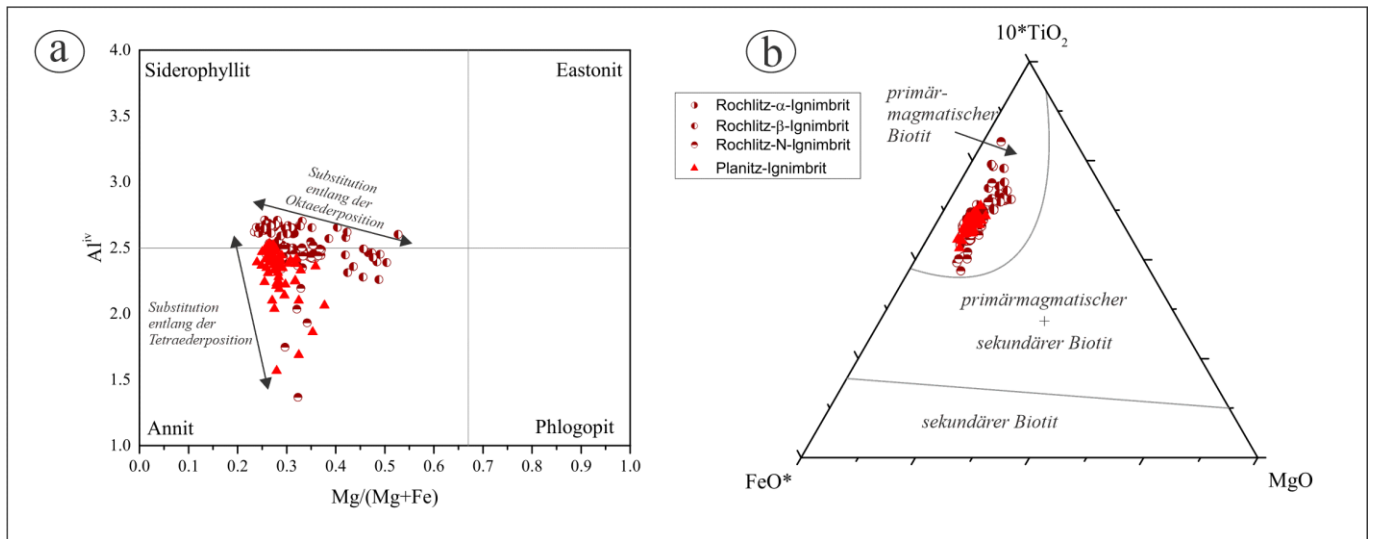


Abbildung 18: a) Klassifikationsdiagramm für Biotit zeigt deutlich zwei verschiedene Substitutionsmechanismen. Während im Biotit des Rochlitz-α- und des Rochlitz-β-Ignimbrite Substitutionen zwischen Fe und Mg entlang der Oktaederposition dominieren, substituiert im Biotit des Rochlitz-N- und Planitz-Ignimbrit Si und Al^{IV}; b) ternäres Diagramm zur Bestimmung von „frischem“, unverwittertem Biotit (nach NACHIT et al. 2005). Daten für den Planitz-Ignimbrit entnommen aus REPSTOCK et al. (2019a).

4.5 Kristallisationsbedingungen

Um die Bildungstemperatur und den Kristallisationsdruck der Minerale in einer Magmenkammer zu rekonstruieren, werden sogenannte Geothermometer und Geobarometer angewandt. Hierbei werden – basierend auf der chemischen Zusammensetzung der Minerale – entweder eine Austauschreaktion oder die Sättigung eines oder mehrerer Elemente in einem Mineral berechnet. Eine weitere Möglichkeit der Ermittlung der Temperatur bietet die Sättigung eines Elements im Vulkanit. Voraussetzung hierbei muss das Nichtvorhandensein von Fremdgesteinseinschlüssen sein, sowie einer möglichen Alteration (siehe Kapitel 4.2.2). Da es in einem kristallisierten und alterierten Ignimbrit schwierig ist korrespondierende Mineralpaare eines Gleichgewichts zu finden, beschränkt sich die Geothermobarometrie im Rochlitzer Vulkansystem auf die Sättigung eines immobilen Spurenelements im Gesamtgesteins-chemismus (Zirkonium-Sättigung) und Mineral (z. B. Ti-in-Biotit).

Eine Möglichkeit eine Temperatur des Magmas zu bestimmen, kann über die Sättigung des Zirkoniums in einer anatektischen Schmelze ermittelt werden (WATSON & HARRISON 1983; BOEHNKE et al. 2013). Um eine größtmögliche Homogenisierung von den grobkörnigen und kristallreichen Pyroklastiten des Rochlitzer Vulkansystems zu erzielen, muss eine entsprechende Menge des zu untersuchenden Materials vorliegen. Dabei muss davon ausgegangen werden, dass die analysierte Probe frei von Fremdgesteinsbruchstücken ist. Das Modell der Zirkon-Löslichkeit kann gemäß WATSON & HARRISON (1983) mit folgender Formel angegeben werden:

$$\ln D_{Zr}^{Zirkon/Schmelze} = \left\{ -3,8 - \left[-0,85 \left(\left(\frac{Na+K+2Ca}{Al*Si} \right) - 1 \right) \right] \right\} + \frac{12900}{T},$$

wobei: $\ln D_{Zr}^{Zirkon/Schmelze}$ = Verhältnis der Zr-Konzentrationen zwischen stöchiometrischen Zirkon und Schmelze,

T = Temperatur an der die Zr-Sättigung erreicht ist.

Da zur Berechnung das Verhältnis von mobilen Kationen (Na, K, Ca, Al, Si) verwendet wird, können nur die Proben berücksichtigt werden, welche der K-Metasomatose kaum oder nicht ausgesetzt wurden (vgl. Kapitel 4.2.2, Abbildung 16). Demnach eignen sich eine Probe des Rochlitz- β (Steinklippen bei Höfgen) und drei Proben des Rochlitz-N für diese Berechnungen. Daraus können Temperaturen der Zr-Sättigung in der Schmelze bei 852°C für den Rochlitz- β - und bei 866 bis 871°C für den Rochlitz-N-Ignimbrit errechnet werden. Zum Vergleich lässt sich aus den Daten von REPSTOCK et al. (2018) für den Wurzen-Ignimbrit eine Temperatur von 879 ± 25 °C ($n = 51$) berechnen (Tabelle 6). Lediglich die Temperaturen des kristallarmen rhyolithischen Planitz-Ignimbrit liegt mit 946 ± 7 °C ($n = 10$; REPSTOCK et al. 2019a) wesentlich höher als bei den kristallreichen Ignimbriten des Nordsächsischen Vulkanitkomplex.

Tabelle 6: Repräsentative geochemische Analysen, die zur Berechnung der Zirkonium-Sättigungstemperatur in den Gestein herangezogen wurde. Gesamtgesteinsanalysen des Planitz-Ignimbrits aus REPSTOCK et al. (2019a), des Wurzen-Ignimbrits aus REPSTOCK et al. (2018). Die errechneten Temperaturen (nach WATSON & HARRISON 1983) gelten nur für die aufgelisteten Analysen.

	<i>Rochlitz-β-Ignimbrit (Steinklippen)</i>	<i>Rochlitz-N-Ignimbrit</i>	<i>Rochlitz-N-Ignimbrit</i>	<i>Planitz-Ignimbrit (Zwickau-Planitz)</i>	<i>Wurzen-Ignimbrit (Großsteinberg)</i>
<i>SiO₂</i>	67,08 wt.%	69,65 wt.%	69,97 wt.%	70,20 wt.%	68,80 wt.%
<i>TiO₂</i>	0,49 wt.%	0,36 wt.%	0,36 wt.%	0,34 wt.%	0,59 wt.%
<i>Al₂O₃</i>	15,25 wt.%	14,88 wt.%	14,89 wt.%	12,50 wt.%	14,95 wt.%
<i>Na₂O</i>	2,95 wt.%	3,42 wt.%	3,46 wt.%	3,71 wt.%	3,18 wt.%
<i>K₂O</i>	5,56 wt.%	5,52 wt.%	5,50 wt.%	3,07 wt.%	5,06 wt.%
<i>CaO</i>	0,87 wt.%	1,34 wt.%	1,36 wt.%	1,54 wt.%	1,65 wt.%
<i>Fe₂O₃</i>	4,16 wt.%	2,82 wt.%	3,43 wt.%	2,43 wt.%	4,10 wt.%
<i>MgO</i>	0,73 wt.%	0,40 wt.%	0,39 wt.%	0,53 wt.%	0,96 wt.%
<i>MnO</i>	0,03 wt.%	0,03 wt.%	0,03 wt.%	0,03 wt.%	0,04 wt.%
<i>Cr₂O₃</i>	<0,002 wt.%	0,003 wt.%	0,003 wt.%	0,01 wt.%	<0,01 wt.%
<i>P₂O₅</i>	0,14 wt.%	0,09 wt.%	0,09 wt.%	0,11 wt.%	0,16 wt.%
<i>Zr</i>	374,2 ppm	289,4 ppm	266,2 ppm	322 ppm	326 ppm
$\frac{Na^+ + K^+ + 2Ca^{2+}}{Si * Al}$	1,26	1,43	1,45	1,41	1,41
<i>Temperatur</i>	852°C	866°C	871°C	861°C	844°C

Ein Mineral, dass sich im besonderen Maß zur Bestimmung von Kristallisationsbedingungen im Rochlitzer Vulkansystem eignet, ist Biotit. Dies ist in seiner Häufigkeit ($\leq 2,9$ Vol.-%, siehe Kapitel 4.1) und seiner Erhaltungsfähigkeit (vgl. Kapitel 4.3) begründet. Mögliche Alteration im Biotit der Rochlitz-Ignimbrite konnten durch das ternäre $\text{TiO}_2\text{-FeO}^*\text{-MgO}$ -Diagramm nach NACHIT et al. (2005) überprüft und ausgeschlossen werden. Das Ti-in-Biotit-Geothermobarometer hat seinen Ursprung in der metamorphen Petrologie (z. B. SCHREURS 1985; HENRY et al. 2005; WU & CHEN 2015; SALLET et al. 2018), findet aber auch Anwendung in der magmatischen Petrologie (z. B. DOUCE 1993; BHATTACHARYA et al. 2014; ASWAD et al. 2016; REPSTOCK et al. 2019a). Die Berechnungen des Ti-in-Biotit-Thermometers (HENRY et al. 2005) und des korrespondierenden Barometers (WU & CHEN 2015) ergeben eine Kristallisation bei $719 \pm 10^\circ\text{C}$ ($n=71$) und $6,0 \pm 0,5$ kbar ($n=14$) im Magmensystem des Rochlitz- α -Ignimbrits, $754 \pm 17^\circ\text{C}$ ($n = 39$) und 4 ± 2 kbar ($n=23$) im Rochlitz- β -, sowie $783 \pm 55^\circ\text{C}$ ($n = 35$) und 6 ± 1 kbar ($n=15$) im Rochlitz-N-Ignimbrit (Abbildung 20). Basierend auf der physikalischen Formel des Gravitationsdrucks lässt sich die Tiefe der Magmenkammer berechnen. Dabei wird eine mittlere Dichte von $2,8 \text{ g/cm}^3$ für das Grundgebirge und eine Erdbeschleunigung von $9,80665 \text{ m/s}^2$ angenommen. Zu Berechnung der Tiefe (d) dient die Summe aus Dichte (ρ) und Beschleunigung (g) als Divisor, während der Druck als Divident fungiert:

$$d = \frac{p}{\rho * g} .$$

Die daraus resultierenden Tiefen der Magmenkammern sind zwischen 10 und 25 km (obere bis mittlere Kruste) anzunehmen. Zum Vergleich, der Biotit des Planitz-Ignimbrits kristallisierte bei $736 \pm 12^\circ\text{C}$ und $1,5 \pm 0,7$ kbar – was einer Magmenkammertiefe von 6 km entspricht (REPSTOCK et al. 2019a).

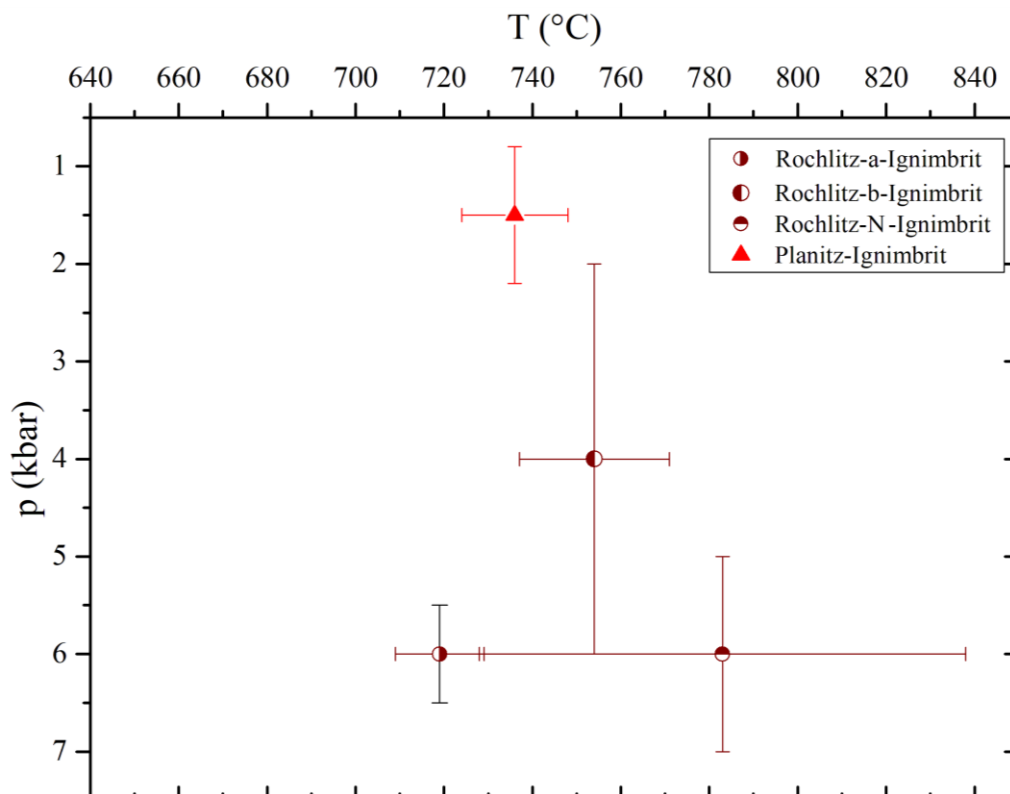


Abbildung 19: Berechneter Kristallisationstemperatur (nach Henry et al. 2005) und –druck (nach Wu & Chen 2015) für Biotit im Rochlitzer Vulkansystem. Daten von Biotit des Planitz-Ignimbrits aus Repstock et al. (2019a).

4.6 Altersdatierung

Bei den erhobenen Daten wird deutlich, dass eine chronologische Abgrenzung der Ignimbrite und der assoziierten Subvulkanite im Rochlitzer Vulkansystem nicht leicht vorzunehmen ist (Tabelle 7). Dies liegt vor allem in der Überlagerung der ermittelten Fehlerwerte der Alter begründet, welche zum einen durch die Auflösung der Messgenauigkeit und zum anderen durch die Langlebigkeit der Magmenkammer erklärt ist. In langlebigen Magmenkammern (> 1 Mio. Jahre), wie sie bei Supereruptionen von kristall-reichen Pyroklastiten vorkommen (z. B. BACHMANN & HUBER 2016; KAISER et al. 2017), führt das permanente Aufschmelzen und wieder Abkühlen durch erneute Magmenzufuhr (*magmatic underplating*) zu einem Zusammenspiel von Kristallisation und Resorption in den Mineralen.

Alle Alter von einstufig gewachsenen Zirkonen liegen auf einer Kurve, welche Konkordia genannt wird und aufgrund des U-Zerfalls gekrümmt ist. Da die meisten Zirkone aber keine einstufige Geschichte erfahren haben, sondern das U-Pb-Isotopengleichgewicht mehrfach durch metamorphe Prozesse und Bleiverluste durch Diffusion im Gestein gestört wurde, liegen nicht alle Messwerte auf der Konkordia. Bei der Berechnung des $^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$ -Zirkon-Alters fließen deshalb lediglich Werte ein, die mindestens 95 % konkordant zur Konkordia sind, was bedeutet, dass diese ein nahezu einstufiges Wachstum erfahren haben. Bei einer singulären Störung (zweistufiges Ereignis) etwa einer Metamorphose kann eine sogenannte Diskordia ermittelt werden, die mit der Konkordia Schnittpunkte an dem Beginn der jeweiligen Ereignisse hat. Der untere Schnittpunkt bildet dabei die Störung des U-Pb-Isotopengleichgewichts ab und der obere das konkordante Alter. Das Diagramm zur Ermittlung des Isotopenalters wird Wetherill-Diagramm oder Konkordia-Diagramm genannt. Bei der Ermittlung welches gemessene Alter, das Kristallisationsalter darstellt, nimmt man in den meisten Fällen das jüngste Alter, um eventuelle Relikte auszuschließen.

Die errechneten $^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$ -Zirkon-Alter, welche mittels der LA-ICPMS erhoben wurden, ergeben Alter von 298 bis 296 Ma für die Rochlitz-Ignimbrite, welche mit den Daten aus HOFFMANN et al. (2013) übereinstimmen ($294,4 \pm 1,8$ Ma, Burgberg bei Lastau). Die Abgrenzung dieser Vulkanite muss also in Verbindung mit chemischen Analysen vorgenommen werden (vgl. HILDRETH & MAHOOD 1985; Kapitel 4.2 und 4.3). Im Planitz-Ignimbrit wurde zunächst ein $^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$ -Zirkon-Alter von 278 ± 5 Ma ermittelt (NASDALA et al. 1998). Dieser zu niedrig errechnete Wert ist zum einen darauf zurückzuführen, dass Standard und Probe extrem unterschiedliche Pb-Gehalte aufweisen und dass der gemessene Zirkon klein und zoniert war. Dieses Alter konnte von HOFFMANN et al. (2013) auf $296,6 \pm 3,0$ Ma korrigiert werden (Tabelle 7), womit eine mögliche Korrelation zwischen Rochlitzer Vulkansystem und Planitz-Ignimbrit wieder zur Diskussion steht (FISCHER 1991; SCHNEIDER et al. 2012).

Tabelle 7: $^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$ -Zirkon-Altersdatierungen an den permischen Vulkaniten Nordsachsens und des Planitz-Ignimbrits.

<i>Probe</i>	<i>Vulkanit</i>	<i>Lokalität</i>	<i>Alter</i>	<i>Referenz</i>
<i>PLA</i>	Planitz-Ignimbrit	Zwickau-Planitz	296,6 ± 3,0 Ma	HOFFMANN et al. (2013)
<i>4</i>		St. Egidien	278 ± 5 Ma	NASDALA et al. (1998)
<i>MH-R-10</i>	Rochlitz- α -Ignimbrit	Polkenberg (Leisnig)	298 ± 3 Ma	<i>unveröff. Daten M. HÜBNER</i>
<i>NSVC-2</i>		Burgberg (Lastau)	294,4 ± 1,8 Ma	HOFFMANN et al. (2013)
<i>Ba1/66</i>	Rochlitz- β -Ignimbrit	Bohrung Ballendorf (Ba1/66)	296 ± 2 Ma	<i>unveröff. Daten M. Hübner</i>
<i>MH-R-49/1</i>	Rochlitz-N-Ignimbrit	Wildschütz	298 ± 3 Ma	<i>unveröff. Daten M. Hübner</i>
<i>MH-O-08</i>	Kemmlitzer Porphyry	Börtewitz (Leisnig)	297 ± 2 Ma	<i>unveröff. Daten M. Hübner</i>
<i>NSVC-3</i>	rhyolithischer Gang, Wurz- zen Vulkansystem	Tummelsberg (Oelschütz)	289.3 ± 4.1	HOFFMANN et al. (2013)

5 Erkenntnisse

5.1 Entwicklung des Nordsächsischen Vulkanit-Komplexes - Chronologie der Supereruptionen

Florenzfunde an der Basis der Kohren-Formation zeigen, dass sich das Nordwestsächsische Becken an der Grenze zwischen Karbons und Perms geöffnet hat (DÖRING 1973; BARTHEL 1976). Die extensionalen Prozesse im Nordsächsischen Becken führten zunächst zu ersten kleineren vulkanischen Eruptionen basischer und intermediärer Zusammensetzung („Andesitoide der ersten Förderperiode“, GLÄßER 1983). Diese erste vulkanische Aktivität beschränkt sich auf die Bornaer Senke im Westen des Nordsächsischen Vulkanitkomplex und die Altenburger Schwelle am Übergang zum Chemnitz Becken (GLÄßER 1983). Im weiteren Zeitverlauf bauten sich mehrere „Stockwerke“ langlebiger Magmenkammern in der Erdkruste auf (vgl. Kapitel 4.4), welche durch aus dem Erdmantel abgeleitete Magmen periodisch gespeist wurden. Diese Magmenkammern führten zur Eruption und Ablagerung kleinerer saurer pyroklastischer Horizonte und kleinerer Lavenvarietäten (HOHL & WILSDORF 1966; GLÄßER 1983) und schließlich zu den großen Supereruptionen (Rochlitz-Ignimbrit, HÜBNER et al. 2016; Wurzzen-Ignimbrit, REPSTOCK et al. 2016; 2018; Planitz-Ignimbrit, REPSTOCK et al. 2019a). Eine chronologische Abfolge anhand von Zirkon-Altersdatierungen detailliert darzustellen, gestaltet sich als schwierig, da langlebige Magmensysteme durch zugeführte Magmen periodisch aufgeheizt werden und es über einen längeren Zeitraum zu einem Zusammenspiel

von Kristallisation und partieller Aufschmelzung (Resorption) kommt (BACHMANN & HUBER 2016; KAISER et al. 2017) und somit die Zirkone nicht mehr das ursprüngliche Kristallisationsalter zeigen.

Der erste große Ausbruch im Nordsächsischen Vulkanitkomplex können entweder die VEI 8-Eruption des Rochlitz- α -Ignimbrits (ca. 298 Ma, unveröffentl. Daten M. HÜBNER) oder die VEI 6-Eruption des Planitz-Ignimbrits (ca. 297 Ma, HOFFMANN et al., 2013), dessen überhitzte pyroklastische Ströme in das Chemnitz Becken einfließen (FISCHER 1991; HEUER 2014). Bei letzterem gilt als gesichert, dass schnell aufsteigende trockene Schmelzen aus der unteren Kruste eine obere rhyolithische Magmenkammer - vermutlich aus dem Rochlitzer Vulkansystem - durchschlagen haben (REPSTOCK et al. 2019a). Der Rochlitz- β -Ignimbrit (ca. 296 Ma) besitzt ähnliche chemische Signaturen wie der Rochlitz- α -Ignimbrit (vgl. Kapitel 4.2 und 4.3), womit sehr wahrscheinlich ein Eruptionseignis angenommen werden kann. Die Eruption des R_N-Ignimbrits muss als eigenständige Eruption bzw. mehrere kleinere Einzeleruptionen angesehen werden, da sich – wie zwischen Planitz und Rochlitz-Ignimbrite - Unterschiede in den Substitutionsmechanismen von Biotit zeigen (Substitution zwischen Al^{IV} und Si an der Tetraederposition, vgl. Kapitel 4.3). Es ist demnach fraglich ob der Rochlitz-N-Ignimbrit als ein Bestandteil der Füllung der Rochlitz-Caldera anzusehen ist. Dennoch ereignete sich diese Eruption zeitnah mit jener der Rochlitz-Ignimbrite und der des Planitz-Ignimbrits. Am Ende der vulkanischen Aktivität steigen von den langlebigen Systemen Magmen auf (z. B. CHIARADIA et al. 2009), welche im Rochlitzer Vulkansystem die Lakkolithe von Leisnig und Grimma bildeten. Das Alter des Rochlitzer Vulkansystems weist mit 297 Ma ein ähnliches Alter, wie die großen Lakkolithe im Halle-Vulkanitkomplex westlich von Leipzig auf (z. B. Schwerzer Lakkolith, 298 \pm 3 Ma, BREITKREUZ et al. 2009). Die weitere post-Rochlitz-Subsidenz des extensionalen Beckens führte zu einem mehrere hundert Meter mächtigen Akkomodationsraum, der mit Konglomerat-Sand-Siltstein-Wechselfolgen und dazwischen geschalteten Tuffen verfüllt wurde (WALTER 2006). Aufgrund teilweiser Erosion können die sedimentären und vulkanosedimentäre Ablagerungen der Oschatz-Formation heute nur noch im Westen und im Osten des Nordsächsischen Vulkankomplex erkundet werden (ZIEBELL 1980; WALTER 2006). Auf Grundlage von Bohrkernkorrelationen konnte das Volumen der Oschatz-Formation im östlichen Bereich mit ca. 2,9 km³ und im Westen mit etwa 5,3 km³ eingegrenzt werden (ROMMEL 2017). Dies kann als Phase der Entspannung der magmatischen und vulkanischen Aktivität im Nordsächsischen Vulkanitkomplex angesehen werden, welche mit der Bildung der kristallreichen Pyroklastite von Dornreichenbach und Wermsdorf wieder aktiviert wurde und schlussendlich in der gewaltigen Wurzener Eruption mündete (289,3 \pm 4,1 Ma, HOFFMANN et al. 2013, Wendt et al. 1995). Letztere bedeckt die nördliche Ausdehnung der eigentlichen Rochlitz-Caldera, weswegen ihre tatsächliche Größe bisher unerkannt bleibt. Auch bleibt offen, ob der Rochlitz-N-Ignimbrit möglicherweise eine eigenständige Caldera bildet, da auch der südliche und westliche Rand durch die mächtigen Pyroklastitlagen des Wurzensystems überdeckt werden.

5.2 Diskussion über das Magmensystem

Anhand der physikalischen Formel des Gravitationsdrucks lassen sich Teufen für die Magmenkammern abschätzen, welche durch das Ti-in-Biotit-Barometer nach WU & CHEN (2015) Tiefen von 10 bis 25 km ergeben (siehe Kapitel 4.4). Da die Zr-Sättigung jedoch keine Bestimmung des Drucks zulässt, muss ein geothermischer Gradient anhand vorhandener Barometer aus verschiedenen Mineralen rekonstruiert werden. Um eine möglichst große Bandbreite an Geothermometern (Ti-in-Biotit-, Zwei-Pyroxen-, Klinopyroxen-Thermobarometrie) zu erhalten, werden Daten aus REPSTOCK et al. (2019a) für das Planitz-System herangezogen. Dieser *Snake-River-Typ*-Ignimbrit eignet sich im besonderen Maß, da sein Eruptionszentrum im Nordsächsischen Vulkanitkomplex vermutet wird (FISCHER 1991) und seine überhitzten Magmen womöglich die kristallreichen Magmenkammern des Rochlitzer Vulkansystems durchschlagen haben (REPSTOCK et al. 2019a). So errechnet sich von der Paläo-oberfläche bis zur Magmenkammer in der oberen Kruste ein geothermischer Gradient von $\frac{\Delta T}{\Delta Z} = 130^\circ\text{C}/\text{km}$ (Abbildung 21). Dieser hohe geothermische Gradient in der oberen Kruste – der ähnlich jenem im Yellowstone Nationalpark ist - muss gerade in humideren klimatischen Phasen meteorisches Wasser zum Zirkulieren gebracht haben, welche sich in Form von zahlreichen

Thermalquellen und brodelnden Geysiren an der Oberfläche verdeutlichten. Mit weiterer zunehmender Tiefe betrug der geothermische Gradient in der mittleren bis unteren Kruste Nordsächsischen Becken $\frac{\Delta T}{\Delta Z} = 12^\circ\text{C}/\text{km}$. Zum Vergleich der durchschnittliche geothermische Gradient in Deutschland beträgt heute $3^\circ\text{C}/100\text{m}$. Unter Annahme, dass das Rochlitzer Vulkansystem demselben geothermischen Pfad gefolgt ist, ergeben sich für die Rochlitz-Ignimbrite aufgrund der Zr-Sättigung Magmenkammertiefen zwischen 12,5 und 15 km (Abbildung 21). Die erreichte Zr-Sättigung des Planitz-Ignimbrits lässt auf eine Magmenkammer bei ca. 20 km Tiefe schließen. Hier vermuten REPSTOCK et al. (2019a) eine andesitische bis dazitische Magmenkammer, welche durch aufsteigende pikritische und basaltische Magmen gefüttert wurde.

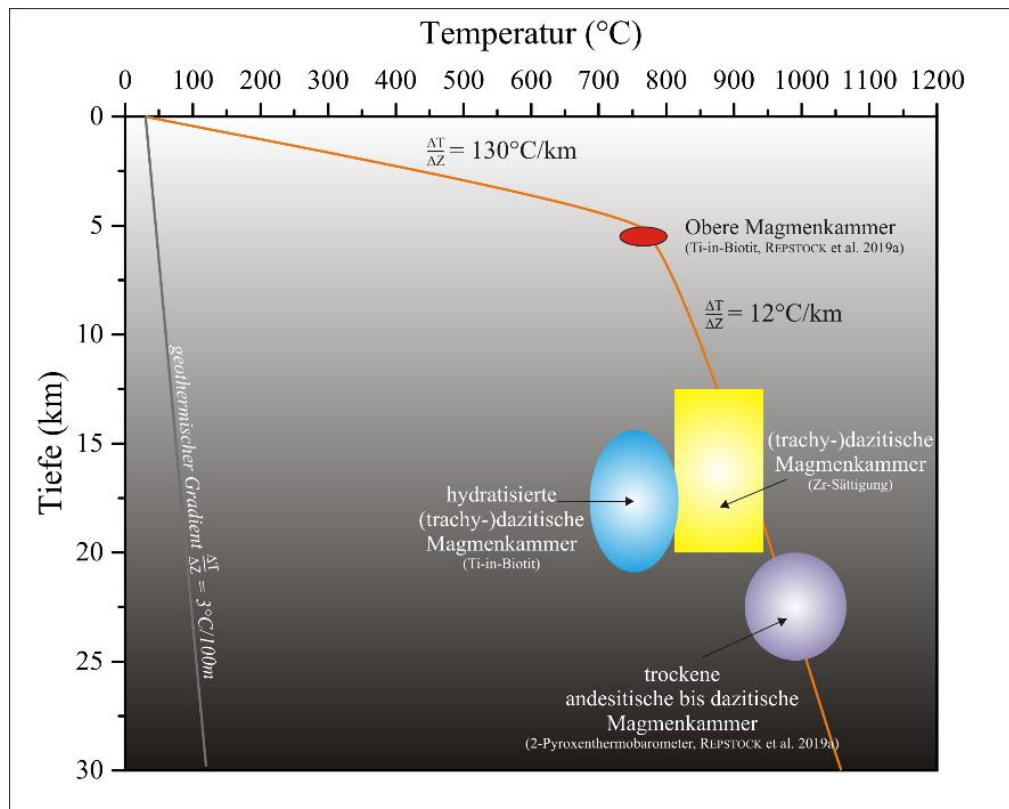


Abbildung 20: Schematische Darstellung des Rochlitzer Magmensystems mit berechneten geothermischen Gradienten.

5.3 Magnituden

Die maximale Ausdehnung der co-genetischen Rochlitz- α - und - β -Ignimbrite von Nordosten nach Südwesten beträgt 54 km (von Oschatz in Nordsachsen bis Borna im Landkreis Leipzig) und in nordwestlicher bis südlicher Richtung 20 km (von Leisnig in Mittelsachsen bis Nerchau im Landkreis Leipzig). Es ist aber durchaus davon auszugehen, dass der nördliche Calderenrand durch den mächtigen Wurzten-Ignimbrit überdeckt wurde. Multipliziert man die sich ergebende Fläche mit der maximalen erbohrten Mächtigkeit von 400 m erhält man ein Volumen von 432 km^3 , welches einem VEI von 7 entsprechen würde. Diese Zahl ist jedoch als erodierter Rest zu interpretieren. Die Ausmaße der ovalen Rochlitz-Caldera sind vergleichbar mit den durch VEI 8 Eruptionen entstandenen känozoischen Calderen des Tobasees (Indonesien, $80 \times 27\text{ km}$), La Garita Caldera (Colorado, $75 \times 35\text{ km}$) oder der Long Valley Caldera (Kalifornien, 32×17 ; Abbildung 22).

Der im Norden des Nordsächsischen Vulkanitkomplex bei Wildschütz und Schöna (Landkreis Nordsachsen) auftretende Rochlitz-N-Ignimbrit könnte – wie es für kristallreiche großvolumige Tuffe üblich ist - ebenfalls aus einer Caldereneruption hervorgegangen sein. Bezieht man sich auf die Verbreitung des Rochlitz-N-Ignimbrits von 13 x 10 km könnte dies womöglich die Caldera andeuten („Wildschützer Caldera“). Wie weit diese unter die Wurzten Caldera abtaucht, ist jedoch weder durch Bohrungen noch durch Aufschlüsse dokumentiert. Eine andere mögliche Caldera könnte den kristallreichen Wermisdorfer-Ignimbrit umreißen (20 x 10 km), dessen Zentrum in den geologischen Karten (z. B. RÖLLIG 1969; WALTER 2006) von einem subvulkanischen Körper aufgedommt wurde (Resurgence-Caldera). Letztere wäre etwas kleiner als die Aso-Caldera auf Kyūshū (25 x 18 km), welche durch eine VEI 7-Eruption entstanden ist (z. B. MIYABUCHI 2011; Abbildung 22). Zur Stellung dieser eigenständigen Calderen und dem Dornreichenbacher Ignimbrit sind weitere vulkanofazielle, petrologische und geochemische Untersuchungen notwendig.

Die Stellung und somit auch das Eruptionszentrum des Planitz-Ignimbrits im Nordsächsischen Vulkanitkomplex ist weiterhin unklar (REPSTOCK et al. 2019a). Belege für den Einstrom pyroklastischer Ströme aus nördlicher Richtung sind in zahlreichen Bohrungen dokumentiert (FISCHER 1991). Seine großflächige Verbreitung von 2100 km² und seine durchschnittliche Mächtigkeit von 20 m im Chemnitz Becken (SCHNEIDER et al. 2012) lassen ein Volumen von 48 km³ berechnen, was einem VEI von 6 entspricht (REPSTOCK et al. 2019a). Da der Top-Vitrophyr des Planitz-Ignimbrits komplett aberodiert wurde (FISCHER 1991) ist auch hier von einer größeren Stärke der Eruption auszugehen (REPSTOCK et al. 2019a).

Mit einem Alter von ca. 289 Ma (HOFFMANN et al. 2013) bildet die etwa 30 x 25 km große Wurzten-Caldera die jüngste Kesselstruktur des Nordsächsischen Vulkanitkomplexes (REPSTOCK et al. 2018). Diese Größe entspricht beispielsweise der Cerro Galán Caldera (38 x 26 km), welche durch eine VEI 8 Eruption entstanden ist (CAS et al. 2011; FOLKES et al. 2011).

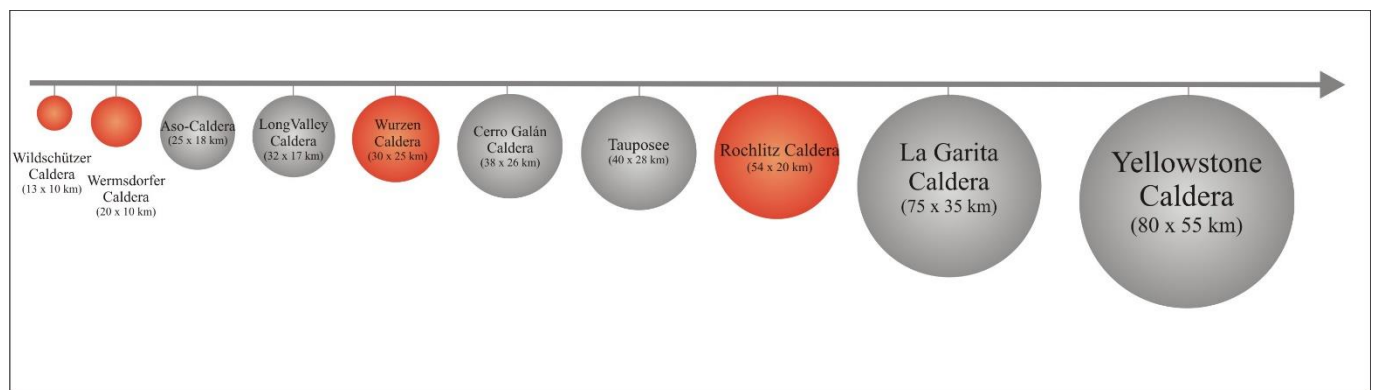


Abbildung 21: Schematischer Größenvergleich der Calderen des permischen Nordsächsischen Vulkanitkomplexes mit jenen der großen Supereruptionen des Känozoikums. Die Calderensysteme Nordsachsens sind farbig hervorgehoben.

Literaturverzeichnis

- ABDEL-RAHMAN, A.F.M.: Nature of biotites from alkaline, calc-alkaline, and peraluminous magmas. *Journal of Petrology* 35, 2, (1994), 525-541.
- ANEGG, R.: Zur Petrographie und Vulkanotektonik des Grimmaer Quarzporphyrs im Nordsächsischen Vulkanitkomplex. *Wissenschaftliche Zeitschrift, Universität Halle*, 4 (1970), 79-86.
- ARIKAS, K.: Geochemie und Petrologie der permischen Rhyolithe in Südwestdeutschland (Saar-Nahe-Pfalz-Gebiet, Odenwald, Schwarzwald) und den Vogesen. *Pollichia* (1986), 322 S.
- ASWAD, K.J., ALI, S.A., SHERAEFY, R.N.A., NUTMAN, A.P., BUCKMAN, S., JONES, B.G., JOURDAN, F.: $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ hornblende and biotite geochronology of the Bulfat Igneous Complex, Zagros Suture Zone, NE Iraq: New insights on complexities of Paleogene arc magmatism during closure of the Neotethys Ocean. *Lithos* 266-267 (2016), 406-413.
- BACHMANN, O., HUBER, C.: Silicic magma reservoirs in the Earth's crust. *American Mineralogist* 101 (2016), 11, 2377-2404.
- BARTHEL, M.: mit Beiträgen von V. Götzelt & G. Urban: Die Rotliegendflora Sachsens. – Abh. Staatl. Mus. Mineral. Geol. zu Dresden, 24, (1976), 1-190; Dresden.
- BECK, V.: Granulometrische, geochemische und mineralchemische Untersuchungen vom Planitz-Ignimbrit und Lythophysen aus dem Raum Zwickau und Chemnitz im Chemnitz Becken, Sachsen. [unveröff.], Bachelorarbeit, TU Bergakademie Freiberg, Freiberg (Sachsen) (2018), 101 S.
- BENEK, R.: Late Variscan calderas/ volcanotectonic depressions in eastern Germany. *Terra Nostra* 7 (1995), 16-18.
- BHATTACHARYA, S., PANIGRAJI, M.K., JAYANANDA, M.: Mineral thermobarometry and fluid inclusion studies on the Closepet granite, Eastern Dharwar Craton, south India: Implications to emplacement and evolution of late-stage fluid. *Journal of Asian Earth Sciences* 91 (2014), 1-18.
- BOEHNKE, P., WATSON, E.B., TRAIL, D., HARRISON, T.M., SCHMITT, A.K.: Zircon saturation re-revisited. *Chemical Geology* 351 (2013), 324-334.
- BRANNEY, M. J., BONNICHSEN, B., ANDREWS, G. D. M., ELLIS, B., BARRY, T.L., MCCURRY, M.: 'Snake River (SR)-type' volcanism at the Yellowstone hotspot track: distinctive products from unusual, high-temperature silicic super-eruptions. *Bulletin of Volcanology*, 70, (2008), 3, 293-314.
- BRÄUER, H.: Zur Entwicklung der Liparitformation im Westteil der Nordsächsischen Mulde und im Erzgebirgischen Becken. – Bericht, (1977), 31 S.; SDAG Wismut, Gröna [unveröff.].
- BREITER, K., NOVÁK, J.K., CHLUPÁČOVÁ, M.: Chemical Evolution of Volcanic Rocks in the Altenberg – Teplice Caldera (Eastern Krušné Hory Mts., Czech Republic, Germany). *GeoLines* 13 (2001), 17-22.
- BREITKREUZ, C.: Die Vulkanite und Subvulkanite im Geopark Porphyryland: Ein spätpaläozoischer Supervulkankomplex!. In: HEß, V., RASCHER, J., ZELLMER, H., eds. *Kultur, Wert, Stein – Verantwortung und Chancen für Geoparks*. Schriftenreihe der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften 88 (2016), 67-72.
- BREITKREUZ, C., EHLING, B. C., SERGEEV, S.: Chronological evolution of an intrusive/extrusive system: the Late Paleozoic Halle Volcanic Complex in the northeastern Saale Basin (Germany) [Geochronologische Entwicklung

- eines Intrusiv-/Extrusiv-Systems: der spätpaläozoische Halle-Vulkanit-Komplex im nordöstlichen Saale-Becken (Deutschland). *Zeitschrift der deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften*, 160, 2, (2009), 173-190.
- CAS, R. A., WRIGHT, H. M., FOLKES, C. B., LESTI, C., PORRECA, M., GIORDANO, G., VIRAMONTE, J. G.: The flow dynamics of an extremely large volume pyroclastic flow, the 2.08-Ma Cerro Galán Ignimbrite, NW Argentina, and comparison with other flow types. *Bulletin of Volcanology* 73, 10, (2011), 1583-1609.
- CASAS-GARCÍA, R., RAPPRIICH, V., BREITKREUZ, C., KOCHERGINA Y., SVOJTKA, M., SCHULZ, B., REPSTOCK, A., LAPP, M., STANEK, K., HOFMANN, M., LINNEMANN, U.: Volcanic evolution and petrology of a late- to post-Variscan volcanic system: The Carboniferous Altenberg-Teplice Caldera (Germany-Czech Republic). *GeoMünster Abstractband (2019a)*, S. 120.
- CASAS-GARCÍA, R., RAPPRIICH, V., BREITKREUZ, C., SVOJTKA, M., LAPP, M., STANEK, K., HOFMANN, M., LINNEMANN, U.: Lithofacies architecture, composition, and age of the Carboniferous Teplice Rhyolite (German–Czech border): Insights into the evolution of the Altenberg-Teplice Caldera. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 386 (2019b), doi: 10.1016/j.jvolgeores.2019.106662.
- CHEN, A., NG, Y., ZHANG, E., TIAN, M.: Volcanic facies. *Dictionary of Geotourism*. Springer, Singapore (2019), doi.org/10.1007/978-981-13-2538-0_2688.
- CHIARADIA, M., MERINO, D., SPIKINGS, R.: Rapid transition to long-lived deep crustal magmatic maturation and the formation of giant porphyry-related mineralization (Yanacocha, Peru). *Earth and Planetary Science Letters* 288 (2009), 3-4, 505-515.
- CHRISTIANSEN, R.L.: The Quaternary and Pliocene Yellowstone Plateau Volcanic Field of Wyoming, Idaho, and Montana. *USGS professional paper (2001)*, S. 146.
- COX, K.G., BELL, J.D., PANKHURST, R.J.: *The Interpretation of Igneous Rocks*. Verlag Allen & Unwin (1987), Springer Auflage 1 (1979), 468 S.
- DAVIS, B. K., & MCPHIE, J.: Spherulites, quench fractures and relict perlite in a Late Devonian rhyolite dyke, Queensland, Australia. *Journal of volcanology and geothermal research*, 71(1), (1996), 1-11.
- DE GENNARO, M., INCORONATO, A., MASTROLORENZO, G., ADABBO, M., SPINA, G.: Depositional mechanisms and alteration processes in different types of pyroclastic deposits from Campi Flegrei volcanic field (Southern Italy). *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 91, 2-4 (1999), 303-320.
- DONALDSON, C.H., HENDERSON, C.M.B.: A new interpretation of round embayments in quartz crystals. *Mineralogical Magazine* 52 (1988), 27-33.
- DOUCE, A.E.P.: Titanium substitution in biotite: an empirical model with applications to thermometry, O₂ and H₂O barometries, and consequences for biotite stability. *Chemical Geology* 108 (1993), 1-4, 133-162.
- DÖRING, H.: Sporostratigraphische Untersuchungen an Sedimenten des Unteren Tuffrotliegenden des Nordwestsächsischen Vulkanitkomplexes. unveröff. Bericht Zentrales Geologisches Institut, Berlin (1973), 7 S.
- EIGENFELD, F.: Zur Methodik der Untersuchungen in permosilesischen Ignimbritablagerungen. – *Hallesches Jb. Geowiss.*, 1: (1977) 85-100; Gotha, Leipzig.
- EIGENFELD, F.: Zur geologischen Entwicklung der vulkanischen Gesteine im Süd- und Ostteil des NW-Sächsischen Vulkanitkomplexes. unveröffentl. Dissertation, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Halle/Saale (1978), 236 S.

- EISSMANN, L.: Überblick über neue Tiefbohrergebnisse im paläozoischen und älteren Untergrund Nordwestsachsens. – Abh. u. Ber. Naturkundl. Mus. „Mauritianum“ Altenburg, 5, (1967), 47-66; Altenburg.
- ELLIS, B. S., WOLFF, J. A., BOROUGHS, S., MARK, D. F., STARKEL, W. A., & BONNICHSEN, B.: Rhyolitic volcanism of the central Snake River Plain: a review. *Bulletin of Volcanology*, 75(8), (2013), 745 S.
- ENGERT, P.: Über Erkundungsarbeiten auf Karbon in der Nordsächsischen Mulde. 1. Pionierbohrung Frauendorf 1954, Kreis Geithain, Bezirk Leipzig. Ergebnisbericht, [unveröff.], staatliche Geologische Kommission, Außenstelle Freiberg (1954), 30 S.
- FANDRICH, R., GU, Y., BURROWS, D., & MOELLER, K.: Modern SEM-based mineral liberation analysis. *International Journal of Mineral Processing*, 84(1-4), (2007), 310-320.
- FISCHER, F.: Das Rotliegende des ostthüringisch-vestsächsischen Raumes (Vorerzgebirgs-Senke, Nordwestsächsischer Vulkanitkomplex, Geraer Becken). [unveröff.], Dissertation, Sektion Geowiss., TU Bergakademie Freiberg, (1991), Freiberg, 171 S.
- FISCHER, I.: Geologische Untersuchungen am Kernmaterial der Bohrung Meltewitz 1/66 (Sa.). [unveröff.], Diplomarbeit, Geol.-Paläont. Inst., Martin Luther-Univ. Halle-Wittenberg, (1968), Halle (Saale), 138 S.
- FOLKES, C. B., WRIGHT, H. M., CAS, R. A., DE SILVA, S. L., LESTI, C., VIRAMONTE, J. G.: A re-appraisal of the stratigraphy and volcanology of the Cerro Galán volcanic system, NW Argentina. *Bulletin of Volcanology* 73, 10, (2011), 1427-1454.
- GEIBLER, M., HEIDENFELDER, W.: Geologische Spurensuche im nördlichen Porphyryland um Wurzen: Geopark – Vergangenheit zwischen Vulkanglut und Gletschereis. In HEß, V., RASCHER, J., ZELLMER, H. (hrsg.): Kultur.Wert.Stein. Verantwortung und Chancen für Geoparks. Schriftenreihe der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften 88 (2016), 205-220.
- DE GENNARO, M., INCORONATO, A., MASTROLORENZO, G., ADABBO, M., SPINA, G.: Depositional mechanisms and alteration processes in different types of pyroclastic deposits from Campi Flegrei volcanic field (Southern Italy). *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 91, 2-4 (1999), 303-320.
- GIFKINS, C.C., HERMANN, W., LARGE, R.R.: *Altered volcanic rocks: a guide to description and interpretation*, Centre for Ore Deposit Research, Eigenverlag des Centre for Ore Deposit Research, University of Tasmania, Australien.
- GILG, H.A., WEBER, B., KASBOHM, J., FREI, R.: Isotope geochemistry and origin of illite-smectite and kaolinite from the Seilitz and Kemmlitz kaolin deposits, Saxony, Germany. *Clay Minerals* 38 (2003), 95-112.
- GLÄßER, W.: Beitrag zur Petrologie, Vulkanotektonik und Vulkanologie der andesitoiden Vulkanite Nordwestsachsens. [unveröff.], Dissertation Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Halle/Saale (1977), 185 S.
- GLÄßER, W.: Beitrag zur Petrologie und Vulkanologie der andesitoiden Vulkanite Nordwestsachsens. *Hallesches Jahrbuch der Geowissenschaften* 8 (1983), Gotha, 185 S.
- GOLD, C: Sedimentologie und Paläontologie frühpermischer Seen des Nordwestsächsischen Vulkanitkomplexes und des Thüringer-Wald-Beckens – Fallstudien zur Paläolimnologie., [unveröff.], Masterarbeit Inst. f. Geol., TU Bergakademie Freiberg (2011), 146 S.

- GROCKE, S.B., DE SILVA, S., WALLACE, P.J., COTRELL, E., SCHMITT, A.K.: Catastrophic caldera-forming (CCF) monotonous silicic magma reservoirs: Constraints from volatiles in melt inclusions from the 3-49 Ma Tara Supereruption, Guacha II Caldera, SW Bolivia. *Journal of Petrology* 58, 11, (2017), 2115-2142.
- GUO, J., GREEN, T.H.: Experimental study of Ba partitioning between phlogopite and silicate liquid at upper mantle pressure and temperature. *Lithos* 24 (1990), 83–95.
- HARTMANN, L.: Kartierung und Petrologie des unterpermischen Grimma-Granitporphyrs und seiner Wirtsgesteine. [unveröff.], Bachelorarbeit, TU Bergakademie Freiberg (2020), 29 S.
- HENRY, D.J., D.J., GUIDOTTI, C.V., THOMSON, J.A.: The Ti-saturation surface for low-to medium pressure metapelitic biotites: Implications for geothermometry and Ti substitution mechanisms. *American Mineralogist* 90 (2005), 316–328.
- HEUER, F.: Geometrische Modellierung der unterpermischen Planitz-Formation, vulkanosedimentäre Faziesanalyse und Mineralchemie der zugehörigen Rochlitz-Ignimbrite in Zwickau (SW-Sachsen). [unveröff.], Masterarbeit, TU Bergakademie Freiberg, Freiberg (Sachsen) (2014), 99 S.
- HILDRETH, W.: Gradients in silicic magma chambers: Implications for lithospheric magmatism. *Journal of Geophysical Research* 86 (1981), B11, 10153-10192.
- HILDRETH, W., MAHOOD, G.: Correlation of ash-flow tuffs. *GSA Bulletin* 96, 7, (1985), 968-974.
- HOFFMANN, U., BREITKREUZ, C., BREITER, K., SERGEEV, S., STANEK, K., TICHOMIROVA, M.: Carboniferous-Permian volcanic evolution in Central Europe - U/Pb-ages of volcanic rocks in Saxony (Germany) and northern Bohemia (Czech Republic). *International Journal of Earth Sciences*, 102 (2013), 73-99.
- HOHL, R., WILSDORF, E.: Der Leisniger Quarzporphyr des nordsächsischen Porphyrgebietes und seine Verwitterung. *Neues Jahrbuch Geologie/ Paläontologie* (1966), 4-13.
- HÜBNER, M., BREITKREUZ, C., LAPP, M., FISCHER, F.: The Lower Permian Rochlitz Supervolcano, North Saxon Volcanic Complex, Germany: characterization of large crystal-rich ignimbrites. IN: BREITKREUZ C., KRONER, U. (Hrsg.): Workshop on „Late Paleozoic magmatism in the Erzgebirge/ Krušné hory: Magma genesis, tectonics, geophysics, and mineral deposits“. *Freiberg Online Geoscience* 46 (2016), 19-20.
- HÜBNER, M., BREITKREUZ, C., PIETRANIK, A., LINNEMANN, U., HEUER, F., REPSTOCK, A.: The Lower Permian Rochlitz caldera: A supervolcano in Central Europe. *GeoMünster 2019, Book of Abstracts* (2019), 120-121.
- ISHIKAWA, Y., SAWAGUCHI, T., IWAYA, S., HORIACHI, M.: Delineation of prospecting targets for Kuroko deposits based on modes of volcanism of underlying dacite and alteration halos. *Mining Geology* 26 (1976), 105-117.
- JENTSCH, F.: Zur minerogenetischen Bedeutung der Gesteinsgläser des Magmatismus des Subsequenzstadiums im sächsischen Raum. [unveröff.], Dissertation, TU Bergakademie Freiberg (1979), 214 S.
- KAISER, J.F., DE SILVA, S., SCHMITT, A.K., ECONOMOS, R., SUNAGUA, M.: Million-year melt–presence in monotonous intermediate magma for a volcanic–plutonic assemblage in the Central Andes. Contrasting histories of crystal-rich and crystal-poor super-sized silicic magmas. *Earth and Planetary Science Letters*, 457, (2017), 73–86. DOI: 10.1016/j.epsl.2016.09.048.
- KOZŁOWSKI, A.: Melt inclusions in pyroclastic quartz from the Carboniferous deposits of the Holy Cross Mts, and the problem of magmatic corrosion. *Acta Geol. Pol.* 31, 3–4 (1981), 273–284.

- LARGE, R.R., GEMMELL, J.B., PAULICK, H., HUSTON, D.: The Alteration Box Plot: A Simple Approach to Understanding the Relationship between Alteration Mineralogy and Litho-geochemistry Associated with Volcanic-Hosted Massive Sulfide Deposits. *Economic Geology* 96, 5, (2001), 957-971.
- LE BAS, M.J.: The role of aluminum in igneous clinopyroxenes with relation to their parentage. *American Journal of Science*, 260, 4, (1962), 267-288.
- LE BAS, M.J., LE MAÎTRE, R.W., STRECKEISEN, A., ZANETTIN, B.: A Chemical Classification of Volcanic Rocks Based on the Total Alkali-Silica Diagram. *Journal of Petrology* 27, 3, (1986), 745-750.
- LE MAÎTRE, R.W., STRECKEISEN, A., ZANETTIN, B., LE BAS, M.J., BONIN, B., BATEMAN, P., BELLIENI, G., DUDEK, A., EFREMOVA, S., KELLER, J., LAMERE, J., SBINE, P.A., SCHMID, R., SORESENSEN, H., WOOLEY, A.R.: *Igneous Rocks: A Classification and Glossary of Terms, Recommendations of the International Union of Geological Sciences, Subcommission of the Systematics of Igneous Rocks*. Cambridge University Press, 2. Auflage (2002), 236 S.
- LETERRIER, J., MAURY, R.C., THONON, P., GIRARD, D., MARCHAL, M.: Clinopyroxene composition as a method of identification of the magmatic affinities of paleo-volcanic series. *Earth Science and Planetary Letters* 59, 1, (1982), 139-154.
- LÖCSE, F., LINNEMANN, U., SCHNEIDER, G., MERBITZ, M., RÖßLER, R.: First U–Pb LA-ICP-MS zircon ages assessed from a volcano-sedimentary complex of the mid-European Variscides (Pennsylvanian, Flöha Basin, SE Germany). *International Journal of Earth Science* 108 (2019), 713-733.
- LUTHARDT, L., HOFMANN, M., LINNEMANN, U., GERDES, A., MARKO, L., & RÖßLER, R.: A new U–Pb zircon age and a volcanogenic model for the early Permian Chemnitz Fossil Forest. *International Journal of Earth Sciences*, 107, 7, (2018), 2465-2489.
- MILLER, M., WARK, D.A.: Supervolcanoes and their explosive supereruptions. *Elements* 4 (2008), 11-16.
- MIYABUCHI, Y.: Post-caldera explosive activity inferred from improved 67–30 ka tephrostratigraphy at Aso Volcano, Japan. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 205, 3-4, (2011), 94-113.
- NACHIT, H., IBHI, A., ABIA, E.H., OHOUD, M.B.: Discrimination between primary magmatic biotites, reequilibrated biotites and neoformed biotites. *Geomaterials (Mineralogy), Comptes Rendus Geoscience* 337, 16, (2005), 1415-1420.
- NEWHALL, C.G., SELF, S.: The volcanic explosivity index (VEI) an estimate of explosive magnitude for historical volcanism. *Journal of Geophysical Research* 87 (1982), 1231-1238.
- OFTEDAHL, C.: Cauldrons of the Permian Oslo Rift. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 3 (1978), 343-371.
- PEARCE, J.A.: A user's guide to basalt discrimination diagrams. In: WYMAN, D.A. (Hrsg.): *Trace Element Geochemistry of Volcanic Rocks: Application for Massive Sulphide Exploration*, Geological Society of Canada Short courses Notes, 12 (1996), 79-113.
- POLA, A., CROSTA, G., FUSI, N., BARBERINI, V., NORINI, G.: Influence of alteration on physical properties of volcanic rocks. *Tectonophysics* 566-567 (2012), 67-86.
- RAMPINO, M.J.: Super-volcanism and other geophysical processes of catastrophic import. In: BOSTROM, N. & ČIRKOVIĆ, M.N. (Hrsg.): *Global catastrophic risks*. Oxford University Press (2008), 553 S.
- REHDA, J.: *Physical Volcanology and petrography of the Lower Permian Leisnig Porphyry (North Saxon Volcanic Complex)*. [unveröff.], Masterarbeit TU Bergakademie Freiberg (2018), 93 S.

- REPSTOCK, A., HEUER, F., HASER, S., SCHULZ, B., LAPP, M., BREITKREUZ, C.: The Early Permian Wurzen caldera system of northern Saxony, Germany: Mineral chemistry and texture disclose insights into an intra-continental magma reservoir. In: Breitzkreuz C., Kroner, U. (Hrsg.): Workshop on „Late Paleozoic magmatism in the Erzgebirge/ Krušné hory: Magma genesis, tectonics, geophysics, and mineral deposits“. Freiberg Online Geoscience 46 (2016), 27-28.
- REPSTOCK, A., BREITKREUZ, C., SCHULZ, B., HÜBNER, M.: The Early Permian intra-plate Wurzen caldera (Saxony, Germany): Tracking the magmatic evolution of a 'monotonous intermediate' by ferromagnesian silicate. Abstract Goldschmidt Conference 13.-18. August 2017, Paris (Frankreich) (2017).
- REPSTOCK, A., BREITKREUZ, C., LAPP, M., SCHULZ, B.: Voluminous and crystal-rich igneous rocks of the Permian Wurzen Volcanic System, northwest Saxony, Germany: Physical volcanology and geochemical characterization. International Journal of Earth Sciences 107, 4, (2018), 1485-1513.
- REPSTOCK, A., HEUER, F., IM, J., HÜBNER, M., SCHULZ, B., BREITKREUZ, C., GILBRICHT, S., FISCHER, F., LAPP, M.: A Late Paleozoic Snake River-type ignimbrite (Planitz vitrophyre) in the Chemnitz Basin, Germany: Textural and compositional evidence for complex magma evolution in an intraplate setting. Journal of Volcanology and Geothermal Research 369 (2019a), 35-49.
- REPSTOCK, A., BREITKREUZ, C., HÜBNER, M., SCHULZ, B., ROMER, R.L.: A competition between magma mingling and mixing: The monotonous intermediates of the Late Paleozoic North Saxon Volcanic Complex in Central Germany. GeoMünster 2019, Book of Abstracts (2019b), 121-122.
- RIDOLFI, F., RENZULLI, A., PUERINI, M.: Stability and chemical equilibrium of amphibole in calc-alkaline magmas: an overview, new thermobarometric formulations and application to subduction-related volcanoes. Contributions to Mineralogy and Petrology 160 (2010), 45-66.
- RICHTER, A., STÄUBLE, H., STEINMANN, C., LANGE, J.-M.: Petrographical investigations and provenance analyses of the raw materials of Neolithic stone tools from different localities southeast of Leipzig (Saxony, Germany). Geologica Saxonica – Journal of Central European Geology 59 (2013), 193-204.
- RIGHTER, K., DVAR, M.D., DELANEY, J.S., VENNEMANN, T.W., HERVIG, R.L., KING, P.L.: Correlations octahedral cations with OH⁻, O²⁻, Cl⁻, and F⁻ in biotite from volcanic rocks and xenoliths. American Mineralogist 87 (2002), 142-153.
- RÖLLIG, G.: Beiträge zur Petrogenese und Vulkanotektonik der Pyroxenquarzporphyre Nordwestsachsens. [unveröff.], Dissertation, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Halle/Saale (1969), 164 S.
- RÖLLIG, G.: Zur Petrogenese und Vulkanotektonik der Pyroxenquarzporphyre (Ignimbrite) des Nordsächsischen Vulkanitkomplexes. Jahrbuch für Geologie 5 (1976), Berlin, 175-268.
- RÖLLIG, G.: Ein Aufschluss der Basis der Pyroxenquarzporphyre im Steinbruch Hengstberg bei Grimma-Hohnstädt im permischen nordwestsächsischen Eruptivkomplex. Z. geol. Wissenschaften Berlin 38 (2010), 5-6, 311-326.
- ROMER, R.L., FÖRSTER, H.J., BREITKREUZ, C.: Intracontinental extensional magmatism with a subduction fingerprint: the Late Carboniferous Halle Volcanic Complex (Germany). Contributions to Mineralogy and Petrology 14, 2 (2001), 201-221.
- ROMMEL, A.: Lithostratigraphie, vulkanosedimentäre Faziesanalyse und Paläogeographie der unterpermischen Oschatz-Formation in Nordsachsen. [unveröff.], Masterarbeit, TU Bergakademie Freiberg, (2017), Freiberg, Sachsen, 113 S.

- ROTHWELL, G.W.: CORDAITALES. In: BECK, C.B. (Hrsg.): Origin and Evolution of Gymnosperms. Columbia University Press (1988), S. 273-297.
- SALLET, R., PRICE, J.D., MORITZ, R.: Natural and experimental fluorine substitution in biotite: Implications for fluid-rock thermochronometry and application to the Seridó Belt, northeastern Brazil. *Chemical Geology* 482, (2018), 32-45.
- SCHÄFER, J.: Petrographische und röntgendiffraktometrische Untersuchungen an Pechsteinen des unterpermischen Planitz-Ignimbrits im Chemnitz-Becken. [unveröff.], Bachelorarbeit, TU Bergakademie Freiberg, Freiberg (Sachsen) (2019), 34 S.
- SCHNEIDER, J.W., ROMER, R.L.: The Late Variscan Molasses (Late Carboniferous to Late Permian) of the Saxothuringian zone. In: Linnemann, U., Romer, R.L. (Hrsg.): Pre-Mesozoic Geology of Saxothuringia. From the Cadomian Active Margin to the Variscan Orogen. *Schweizerbart* (2010), 323-346.
- SCHNEIDER, J., RÖßLER, R. & FISCHER, F.: Rotliegend des Chemnitz-Beckens (syn. Erzgebirge-Becken). – In: Deutsche Stratigraphische Kommission (Hrsg.; Koordination und Redaktion: H. Lütznier & G. Kowalczyk für die Subkommission Perm-Trias): *Stratigraphie von Deutschland X. Rotliegend. Teil I: Innervariscische Becken.* – Schriftenr. Dt. Ges. Geowiss, Heft 61: (2012), 530-588, Hannover.
- SCHREURS, J.: Prograde metamorphism of metapelites, garnet-biotite thermometry and prograde changes of biotite chemistry in high-grade rocks of West Uusimaa, Southwest Finland. *Lithos*, 18 (1985), 69-80.
- SELF, S.: The effects and consequences of very large explosive volcanic eruptions. *Philosophical Transactions of the Royal Society A – mathematical, physical and engineering sciences* 364, (2006), 1845, <http://doi.org/10.1098/rsta.2006.1814>
- SILLITOE, R. H.: Gold-rich porphyry deposits: descriptive and genetic models and their role in exploration and discovery. *Reviews in Economic Geology*, 13, (2000): 315-345.
- SŁABY, E., BREITKREUZ, C., ŹABA, J., DOMAŃSKA-SIUDA, J., GAIDZIK, K., FALENTY, K., FALENTY, A.: Magma generation in an alternating transtensional–transpressional regime, the Kraków–Lubliniec Fault Zone, Poland. *Lithos* 119 3-4, (2010), 251-268
- SUN, S.-S., MCDONOUGH, W. F.: Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts. Implications for mantle composition and processes. *Geological Society, London, Special Publications*, 42 (1), (1989), 313–345. DOI: 10.1144/GSL.SP.1989.042.01.19.
- TAYLOR, S. R., & MCLENNAN, S. M.: *The continental crust: its composition and evolution*, (1985). Oxford: Blackwell.
- TICHOMIROVA, M.: ²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb-Einzelzircondatierungen zur Bestimmung des Intrusionsalters des Niederbobritzscher Granites. *Terra Nostra*, 8, (1997), 183-184.
- WALTER, H.: Zum Alter der Kaolinisierung in Sachsen. *Mauritiana Naturkundliches Museum Altenburg* 13,1 (1991), 213-224.
- WALTER, H.: Das Rotliegend der Nordwestsächsischen Senke. Veröff. Museum Naturkunde Chemnitz 29 (2006), Chemnitz, 157-176
- WALTER, H.: Die wissenschaftliche Grabung Börtewitz: Lebewelt eines 290 Mio. Jahre alten Sees. *Exkursionsf. u. Veröff. Dt. Ges. Geowiss.* 243 (2010a), Hannover, 54-64

- WALTER, H.: Rotliegend im Nordwestsächsischen Becken. In: Lützner, H., Kowalczyk, G. für die Subkommission Perm-Trias (Hrsg.): Stratigraphie von Deutschland X. Rotliegend. Teil I: Innervariscische Becken. Schriftenreihe der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften 61 (2012), Hannover, 517-529
- WATSON, E. B., & HARRISON, T. M.: Zircon saturation revisited: temperature and composition effects in a variety of crustal magma types. *Earth and Planetary Science Letters*, 64(2), (1983), 295-304.
- WEISE, C.: Untersuchungen des Rotliegend-Vulkanismus im Raum Altenburg. [unveröff.], Masterarbeit, TU Bergakademie Freiberg (2018), 95 S.
- WENDT, I., HÖHNDORF, A., WENDT, J.I., MÜLLER, P., WETZEL, K.: Radiometric dating of volcanic rocks in NW Saxony by combined use of U-Pb and Sm-Nd zircon dating as well as Sm-Nd and Rb-Sr whole-rock and mineral systematics. *Terra Nostra* 1995, 7 (11th Meeting on Geodynamics of the European Variscides, 2nd. Symposium on Permocarboniferous Igneous Rocks), (1995), 147-148, Potsdam.
- WETZEL, K., GERSTENBERGER, H., WAND, G., WENDT, I.: Zur Geochemie der nordwestsächsischen Vulkanite. *Z. Geol. Wiss.* 23, 4, (1995), 371–400
- WILLCOCK, M.A.W., CAS, R.A.F., GIORDANO, G., MORELLI, C.: The eruption, pyroclastic flow behaviour, and caldera infilling processes of the extremely large volume (>1290 km³), intra- to extra-caldera, Permian Ora (Ignimbrite) Formation, Southern Alps, Italy. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 265 (2013), 102-126
- WILSDORF, E.: Beitrag zur Kenntnis des Leisniger Porphyrkomplexes unter besonderer Berücksichtigung der Verwitterungsformen. [unveröff.], Diplomarbeit Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Halle-Saale (1963)
- WOTZLAW, J.-F., BINDEMAN, I.N., WATTS, K.E., SCHMITT, A.K., CARICCHI, L., SCHALTEGGER, U.: Linking rapid magma reservoir assembly and eruption trigger mechanisms at evolved Yellowstone-type supervolcanoes. *Geology* 42, 9, (2014), 807-810
- WU, C.-M., CHEN, H.-X.: Revised Ti-in-biotite geothermometer for ilmenite or rutile bearing metapelites. *Sci. Bull.* 60 (1) (2015), 116–121.
- ZEGERS T.E., VAN KEKEN P.E.: Middle Archean continent formation by crustal delamination. *Geology* 29, 12, (2001), 1083–1086.
- ZIEBELL, J.: Zur Metallogenie des sedimentären Permosiles von Nordwestsachsen. [unveröff.], Dissertation, TU Bergakademie Freiberg, (1974), 212 S.
- ZIEBELL, J.: Zur Metallogenie der Buntmetalle on sedimentären Permosiles von Nordwestsachsen – Freiburger Forschungsheft C353, (1980), Leipzig: VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie.

Anhang

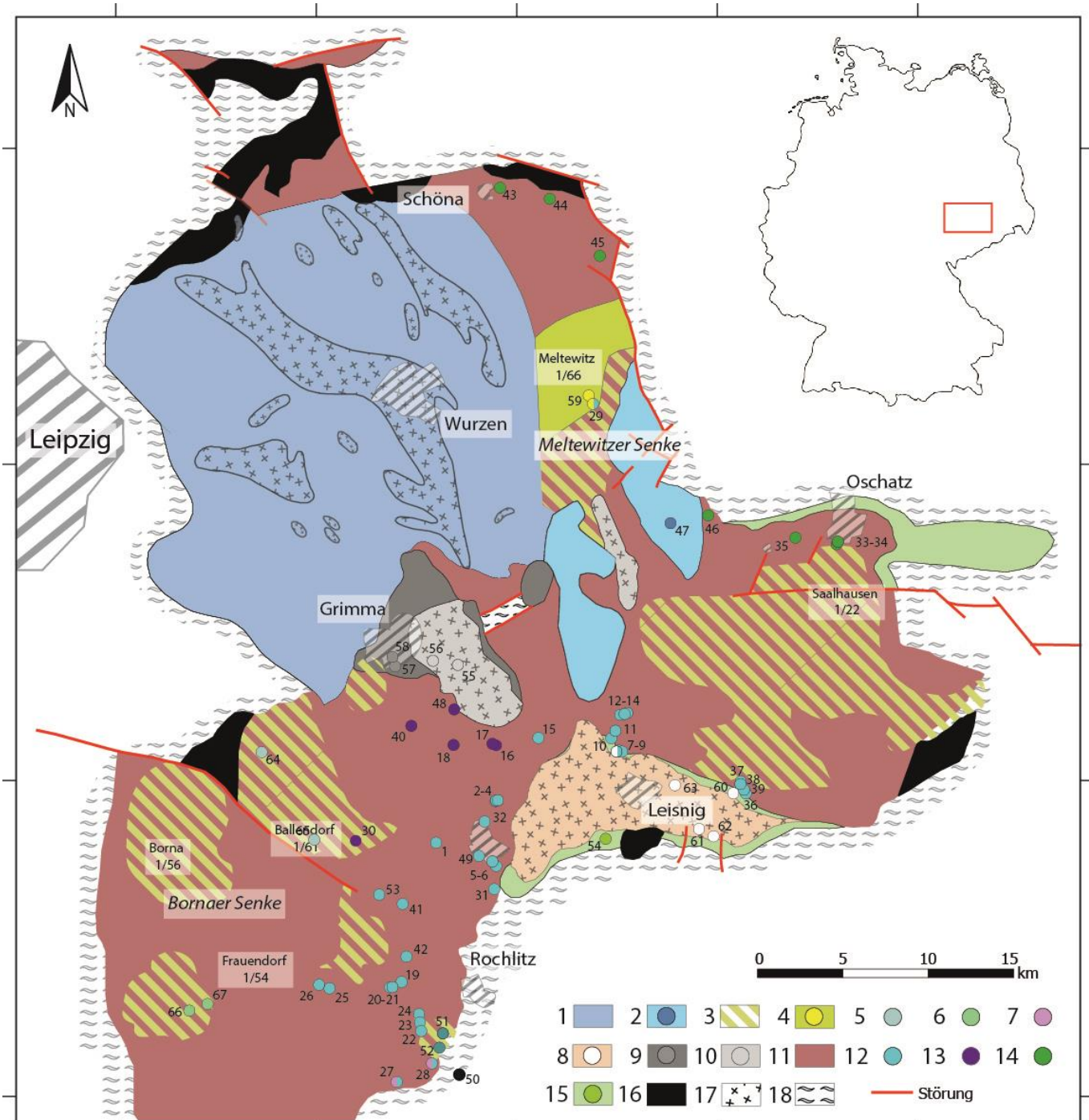


Abbildung: Vereinfachte geologische Karte des Nordsächsischen Vulkanitkomplexes ohne Deckgebirge (verändert nach RÖLLIG 1969; WALTER 2006; ROMMEL 2017). Kreise markieren dokumentierte und beprobte Aufschlüsse und Bohrungen mit Aufschlussnummern. Signaturen: 1 – Wurzen-Ignimbrit, 2 – Wernsdorf-Ignimbrit, 3 – Oschatz Fm. undifferenziert, 4 – Dornreichenbacher Porphyry, 5 – Buchheimer Porphyry, 6 – Frohburger Porphyry, 7 – Rochlitzer Porphyrtuff, 8 – Leisniger Porphyry, 9 – Gattersburger Porphyry, 10 – Grimmaer Porphyry, 11 – Rochlitz Ignimbrit (undiff.), 12 – Rochlitz- α , 13 – Rochlitz- β , 14 – Rochlitz-N, 15 – Köhren Fm., 16 – Andesitoide, 17 – Subvulkanit, 18 – Cadomisches und Variszisches Grundgebirge.

Herausgeber:

Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG)

Pillnitzer Platz 3, 01326 Dresden

Telefon: +49 351 2612-0

Telefax: +49 351 2612-1099

E-Mail: lfulg@smul.sachsen.de

www.lfulg.sachsen.de

Das LfULG ist eine nachgeordnete Behörde des Sächsischen Staatsministeriums für Energie, Klimaschutz, Umwelt und Landwirtschaft.

Autoren:

Marcel Hübner

TU Bergakademie Freiberg, Institut für Geologie

Bernhard-von-Cotta-Straße 2, 09599 Freiberg

Telefon: +49 3731 39-3299

E-Mail: marcel.huebner@geo.tu-freiberg.de

Alexander Repstock

Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie

Abteilung 10: Geologie/Referat 102: Geologische Kartierung/Geophysik

Postfach 10 05 10, 01076 Dresden

Telefon: +49 3731 294-1203

E-Mail: alexander.repstock@smul.sachsen.de

Axel Rommel

Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie

Abteilung 10: Geologie/Referat 102: Geologische Kartierung/Geophysik

Frank Fischer

Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie

Abteilung 10: Geologie

Manuel Lapp

Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie

Abteilung 10: Geologie/Referat 101a: Sächs. Gesteinsanalytikzentrum (SGA)

Christoph Breitzkreuz

TU Bergakademie Freiberg, Institut für Geologie

Bernhard-von-Cotta-Straße 2, 09599 Freiberg

Franziska Heuer

Museum für Naturkunde, Leibniz Institute for Evolution and Biodiversity

Invalidenstraße 43, 10115 Berlin

Redaktion:

Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie

Abteilung 10: Geologie

Telefon: +49 3731|294-1001

Fotos:

Autoren oder genannte Personen in den Bildunterschriften

Redaktionsschluss:

27.04.2020

ISSN:

1867-2868

Hinweis:

Die Broschüre steht nicht als Printmedium zur Verfügung, kann aber als PDF-Datei unter <https://publikationen.sachsen.de/bdb/> heruntergeladen werden.

Verteilerhinweis

Diese Informationsschrift wird von der Sächsischen Staatsregierung im Rahmen ihrer verfassungsmäßigen Verpflichtung zur Information der Öffentlichkeit herausgegeben.

Sie darf weder von Parteien noch von deren Kandidaten oder Helfern zum Zwecke der Wahlwerbung verwendet werden. Dies gilt für alle Wahlen. Missbräuchlich ist insbesondere die Verteilung auf Wahlveranstaltungen, an Informationsständen der Parteien sowie das Einlegen, Aufdrucken oder Aufkleben parteipolitischer Informationen oder Werbemittel. Untersagt ist auch die Weitergabe an Dritte zur Verwendung bei der Wahlwerbung.

*Täglich für
ein gutes Leben.*

www.lfulg.sachsen.de